ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe LM-33

Sede di Forlì

TESI DI LAUREA

In S.S.D. ING-IND/14 Progettazione e costruzione di macchine

VERIFICA SECONDO NORME UNI EN DELLA RESISTENZA STATICA E DINAMICA DELLE GRU MODELLO _400 E _430 PER AUTOCARRO

Candidato:
MARTINI CESARE

Relatore:
Prof. Ing. **DAL RE VINCENZO**

Correlatore:
Ing. **BARLOTTI GIANCARLO**

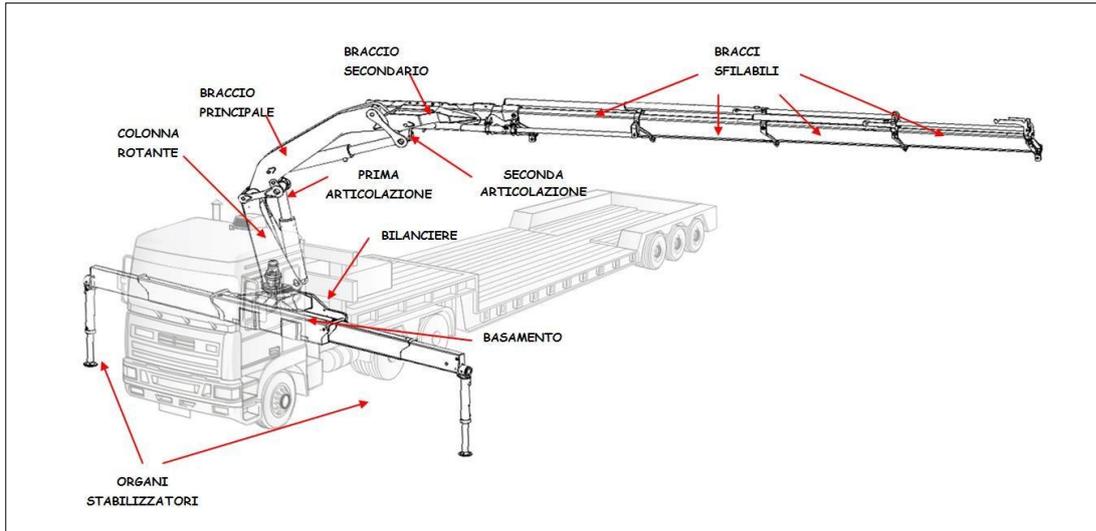
Anno Accademico 2011/2012
Sessione I

Alla mia famiglia

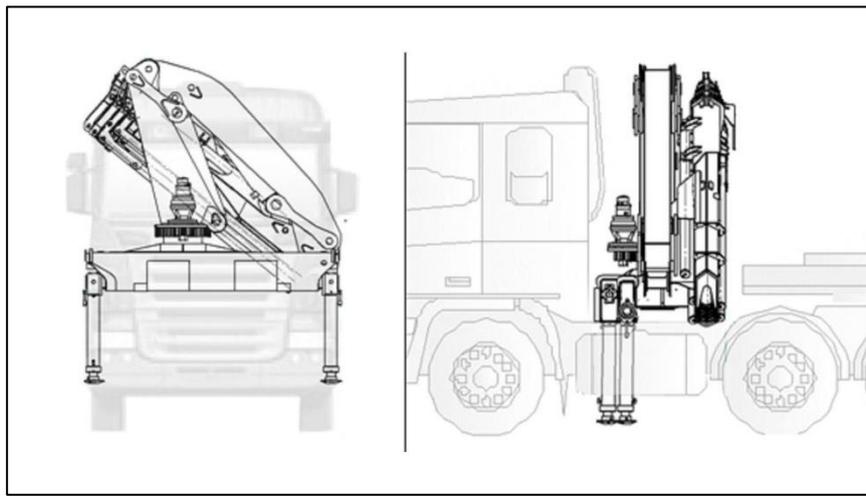
Introduzione

Copma2000 è un'azienda presente da oltre 40 anni nel settore della progettazione e realizzazione di gru idrauliche per camion, autocarri ed applicazioni marine, compresi una vasta gamma di accessori atti a soddisfare ogni esigenza.
Sono presenti oltre venti modelli di gru polivalenti, disponibili in versioni con bracci corti e lunghi , accessoriati con jib, verricelli, radiocomandi e navicelle.
Le macchine utilizzate per il sollevamento e lo spostamento di carichi rilevanti, trovano una larghissima diffusione in numerosi settori, in particolar modo nell'edilizia, nel trasporto di carichi rilevanti e, più in generale, in tutti quei campi dove si rende necessaria la movimentazione in loco del carico trasportato.
Il binomio "gru di sollevamento - autocarro industriale" ben si sposa con la versatilità nella movimentazione della gru stessa.
Risulta ovvio che questa tipologia di macchine è soggetta a sollecitazioni molto gravose che implicano geometrie molto massicce e sezioni di ampiezza elevata. Oltre agli ingombri, questi fattori portano necessariamente a un peso affatto trascurabile della struttura delle macchine, che a loro volta produrranno delle sollecitazioni interne nei vari elementi.
Poiché il materiale ha una resistenza limitata, l'azione del peso proprio della struttura penalizza necessariamente e in maniera considerevole sia la massa del carico sollevabile dalla gru stessa, sia la massa trasportabile dall'autocarro sul quale la macchina è montata.
Per adattare le macchine a ogni tipologia di autocarro, è necessario uno studio del bilanciamento al fine di garantirne un'adeguata stabilità.

Risulta fondamentale anche l'aspetto della sicurezza, che implica l'adozione di un sistema elettronico di limitazione del carico.

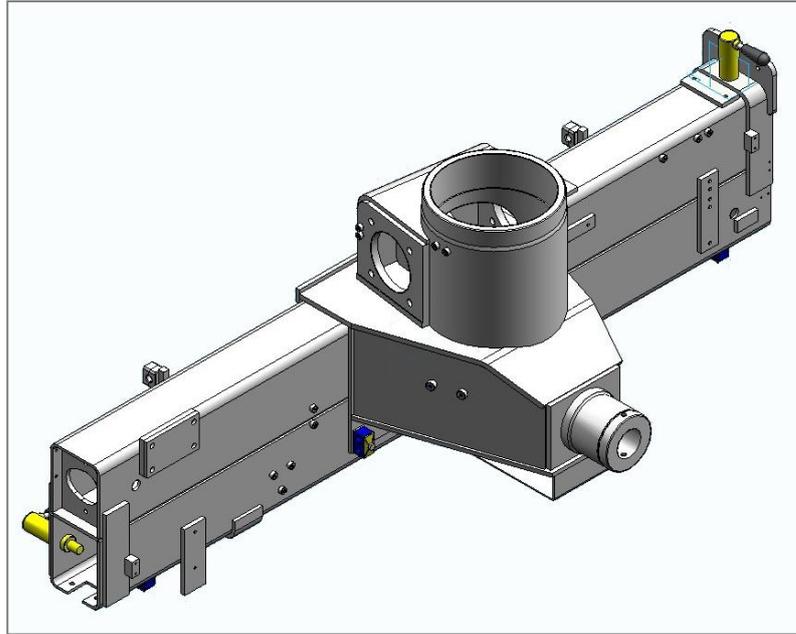
Per capire in maniera semplice il tipo di macchina che si andrà ad analizzare, si riporta uno schema di massima della architettura della gru; in particolare si osserva la gru in diverse disposizioni andando a mettere in mostra i componenti principali.

Tali macchine quindi sono caratterizzate da diverse possibilità di movimentazione, in funzione della struttura di base e dalle esigenze dell'utente finale, tuttavia l'architettura principale nei diversi modelli è piuttosto standardizzata.

La figura precedente e le foto mostrano i principali componenti strutturali della gru, che fanno parte dello studio progettuale, in una generica configurazione di lavoro. Le possibili configurazioni di lavoro assunte dai bracci per compiere il lavoro di sollevamento e spostamento dei pesi sono infinite e si analizzano quelle che per esperienza danno le maggiori sollecitazioni strutturali.

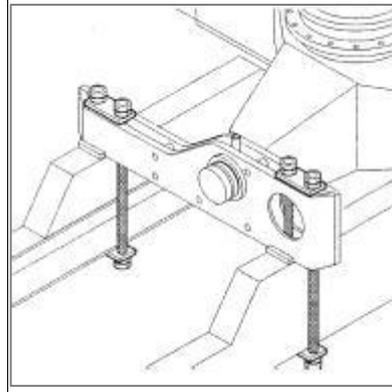
La figura seguente mostra invece la gru in configurazione riposo, ovvero completamente chiusa e occupante il minimo ingombro.

Schema di una gru

I gruppi principali che compongono una gru sono quattro:

1. il basamento
2. la colonna
3. il braccio principale
4. il braccio secondario ed il gruppo sfili

Il basamento è il telaio della macchina: attraverso un bilanciere, si va ad ancorare al telaio dell’autocarro sul quale è fissato.

Il basamento è a sua volta composto da due sottoinsiemi, il gruppo traverse e il castello o gruppo rotazione. All'interno del gruppo traverse scorrono dei bracci alle cui estremità sono presenti i piedi, dispositivi atti a conferire una maggiore stabilità alla macchina durante le operazioni di carico, semplicemente aumentando l'area della base d'appoggio.

Il castello invece è un collegamento tra il gruppo traverse e la colonna e su di esso si impegna il bilanciere, ovvero un sistema a 1gdl (una rotazione) in grado recuperare ed assorbire le eventuali tensioni torsionali indotte sul telaio del veicolo

.

Il castello presenta sulla sommità un tubo colonna, che “genera” l’asse di rotazione della colonna principale.

Alla colonna è solidale un lato del cilindro principale, il sistema oleodinamico che muove il braccio primario.

In più, poiché le gru sono solitamente montate su autocarri o su veicoli non dedicati, la colonna è un sistema che implicitamente consente di superare gli ingombri imposti dal mezzo sul quale la gru è montata.

Alla colonna e al cilindro principale è collegato il braccio primario.

La struttura del braccio primario è molto simile a quella già vista: un martinetto oleodinamico comanda l’apertura del braccio secondario, collegato al primario con tipologie simili alle precedenti.

Si trovano infine il braccio secondario con il gruppo sfili: un braccio simile al primario nel quale è connesso il gruppo sfili, ovvero un insieme di tubolari (due o più) che scorrono l’uno all’interno dell’altro, in modo che l’elemento sia allungabile o retrattile, per mezzo di attuatori oleodinamici lineari indipendenti.

Caratteristiche principali della gru

Per sfruttare al massimo le prestazioni della gru e renderla commercialmente competitiva, è bene cercare di massimizzare la capacità di carico utile, sia in termini di volume che di massa, dell’autocarro su cui viene installata la gru.

La soluzione che la Copma 2000 adotta è il montaggio della gru dietro la cabina di guida dell'autocarro in una configurazione tale che a riposo si trovi ad essere trasversale all'asse longitudinale del mezzo. Per superare gli ingombri laterali massimi consentiti dall'autocarro, si sfrutta un disassamento ("inzancatura") tra gli assi longitudinali del braccio principale e di quello secondario, in modo che la larghezza in posizione di riposo risulti semplicemente dalla somma delle larghezze dei bracci.

Per ottenere una struttura con elevate prestazioni e volume e massa ridotti, vengono principalmente impiegate lamiere in materiali speciali con alto valore di snervamento.

Per massimizzare il campo di azione, congiuntamente alla capacità di estensione degli sfili, viene utilizzato un motoriduttore idraulico installato sulla colonna rotante. Attraverso un pignone che ingrana con una corona dentata solidale al basamento, permette una rotazione continua della colonna e dei rispettivi bracci a essa collegati.

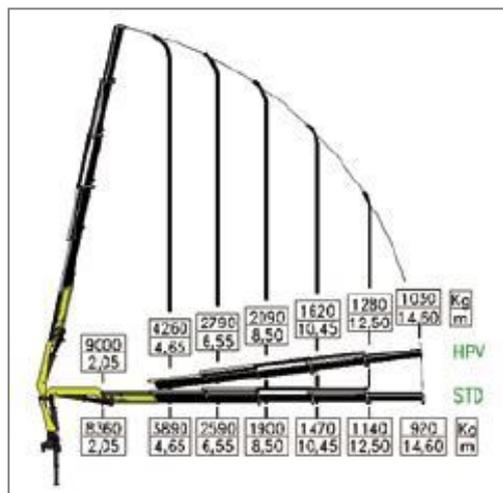
Alla macchina sono richieste anche elevata versatilità e "interfacciabiltà".

Per avere un'elevata flessibilità e soddisfare il più possibile le richieste del mercato, i modelli in esame presentano otto versioni base, in funzione del numero di bracci sfilabili richiesti.

Oltre agli allestimenti di base, le gru permettono l'impiego di un ulteriore accessorio denominato jib o prolunga integrale. Anche quest'ultimo accessorio possiede dei bracci telescopici da tre a quattro bracci sfilabili, chiamato JIB3 JIB4 rispettivamente o più in generale prolunghe integrali (P.I.), opportunamente

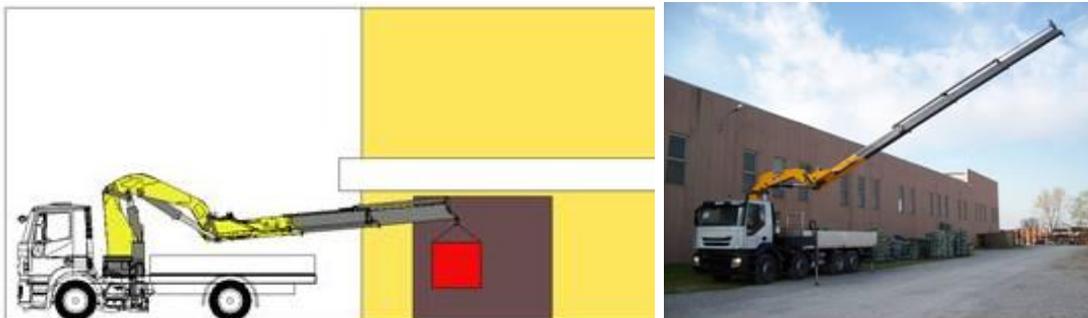
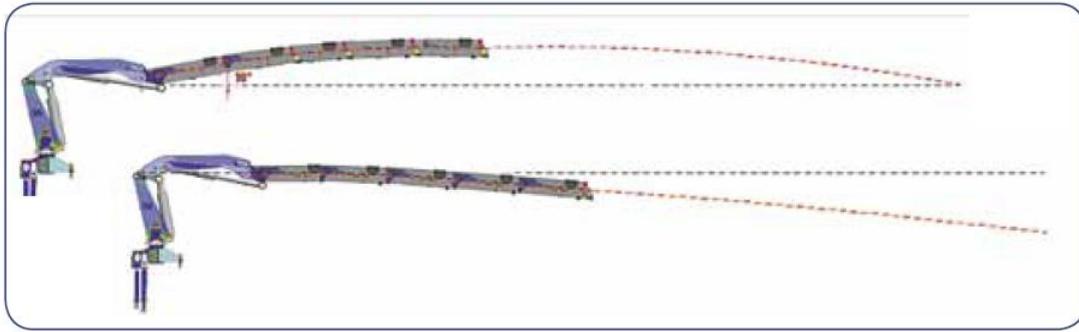
inserita nei bracci sfilabili della gru base e collegate al circuito di potenza della macchina.

Si possono inoltre montare, sia sulle gru base che su quelle dotate di prolunghe integrali, delle prolunghe manuali, regolabili manualmente, sempre allo scopo di aumentare lo sbraccio massimo delle macchine.

Per incrementare la capacità di sollevamento, ogni versione delle gru utilizza un sistema oleodinamico azionato elettronicamente, detto "sistema HPV" (High Power Velocity) che, gestendo opportunamente l'apertura e la chiusura di valvole del circuito oleodinamico, permette un aumento della capacità di carico della gru, a fronte però di un aumento del tempo di sollevamento in modo da ridurre l'entità degli effetti dinamici durante il sollevamento e l'abbassamento del carico.

Questo sistema si attiva in modo automatico, al momento in cui si sta sollevando un carico superiore ad una certa soglia tarata in funzione della pressione di esercizio della gru. Tale sistema riduce la velocità di sollevamento diminuendo i coefficienti dinamici sulla struttura, dovuti ai pesi propri della gru stessa, aumentando così la capacità di carico della gru. Tutto questo in quanto le massime sollecitazioni della gru, sono una combinazione di due fattori: carico Q e peso proprio P moltiplicati per i relativi coefficienti. Se un fattore cala l'altro può aumentare in una somma che deve essere sempre uguale e costante. Il beneficio della riduzione del coefficiente dinamico, si traduce in un aumento della capacità di carico dall' 8 al 10%, dando anche una maggiore gradualità ai movimenti della gru.

In alternativa al sistema standard di stabilizzatori dell'insieme gru-autocarro per le fasi di lavoro, le _400 e _430 possono essere equipaggiate con un sistema più leggero chiamato "sistema ad allargamento ridotto" che prevede l'impiego di due soli cilindri di allargamento, a differenza dei quattro dello standard.

Per recuperare l'inflessione di bracci sfilabili e far raggiungere e questi una configurazione di lavoro altrimenti impossibile, la gru ha la possibilità di far spazzare al braccio secondario un angolo che si estende oltre il braccio principale, detto angolo negativo.

Sono gru progettate con l'articolazione del braccio secondario che può effettuare un angolo negativo rispetto al braccio principale, permettendo di posizionare carichi al di sotto di porticati o tettoie.

L'angolo negativo permette di recuperare l'inflessione del gruppo bracci dovuta sia al peso proprio che al carico sollevato sugli sfili.

La verifica è stata effettuata su una macchina già esistente e presente in commercio della quale si è già a conoscenza di tutte le caratteristiche geometriche e resistenziali.

Le macchine oggetto di studio sono due gru a sfili telescopici modelli _400 e _430, con allestimento fino a otto sfili nel braccio secondario, ed appartenenti alle categorie delle gru *40t·m* e *43t·m*, dove 40t·m (momento di sollevamento) corrisponde alla capacità di carico della gru risultante dal prodotto del peso

sollevabile dal singolo braccio per la distanza dall'asse colonna. Le gru appartenenti a questa categoria presentano un andamento lineare nell'intorno delle 40t·m e 43t·m per ogni carico sollevato alle diverse distanze assunte dai bracci sfilabili dall'asse colonna.

La capacità di carico costante in prossimità dei punti di massima estensione della macchina è permessa dal tipo di collegamento tra il braccio primario, la colonna e il cilindro principale: si utilizza di fatto un quadrilatero articolato che consente di avere un braccio pressoché costante anche alle massime aperture del cilindro principale, come mostrato dai diagrammi di carico di seguito riportati.

400.8
10°
15300 10750 * 7200 4850 3520 2660 2090 1680 1400 1170 900 kg
2,05 3,10 4,75 6,55 8,45 10,45 12,45 14,60 16,80 19,10 21,40 m
33660 23650 15840 10670 7744 5852 4598 3696 3080 2574 1980 lbs
6'9" 10'2" 15'7" 21'6" 27'9" 34'3" 40'10" 47'11" 55'1" 62'8" 70'3" ft
H1-B3

430.8
10°
15650 11000 * 7450 5100 3750 2870 2290 1870 1560 1320 1000 kg
2,05 3,10 4,75 6,55 8,45 10,45 12,45 14,60 16,80 19,10 21,40 m
34430 24200 16390 11220 8250 6314 5038 4114 3432 2904 2200 lbs
6'9" 10'2" 15'7" 21'6" 27'9" 34'3" 40'10" 47'11" 55'1" 62'8" 70'3" ft
H1-B3

Lo scopo principale di questa tesi è verificare secondo le attuali norme europee (UNI EN) una gru progettata seguendo la superata normativa tedesca DIN. Una volta stabilita la conformità o la discordanza con le nuove norme, nel caso in cui la struttura risulti sovradimensionata, ovvero con una differenza tra le sollecitazioni di progetto e quelle ammissibili sufficientemente elevata, si vuole arrivare a determinare la differenza di carico con la quale è possibile aumentare quello massimo attualmente ammesso.

Pensando di estendere questo concetto a tutti i modelli in produzione, l'azienda si troverebbe ad avere la stessa gamma di prodotti, ma caratterizzati ciascuno da prestazioni superiori, portando a un sostanziale vantaggio sia di tipo economico che di rendimento della macchina.

Il lavoro si è articolato nel seguente modo:

- Studio delle normative inerenti alle apparecchiature di sollevamento;
- Determinazione dei parametri di lavoro secondo normativa;
- Scelta delle sezioni di riferimento sulle quali eseguire la verifica;
- Esecuzione della verifica;
- Ricerca di possibili soluzioni per verificare le macchine.

Per questa tesi vengono seguite le norme:

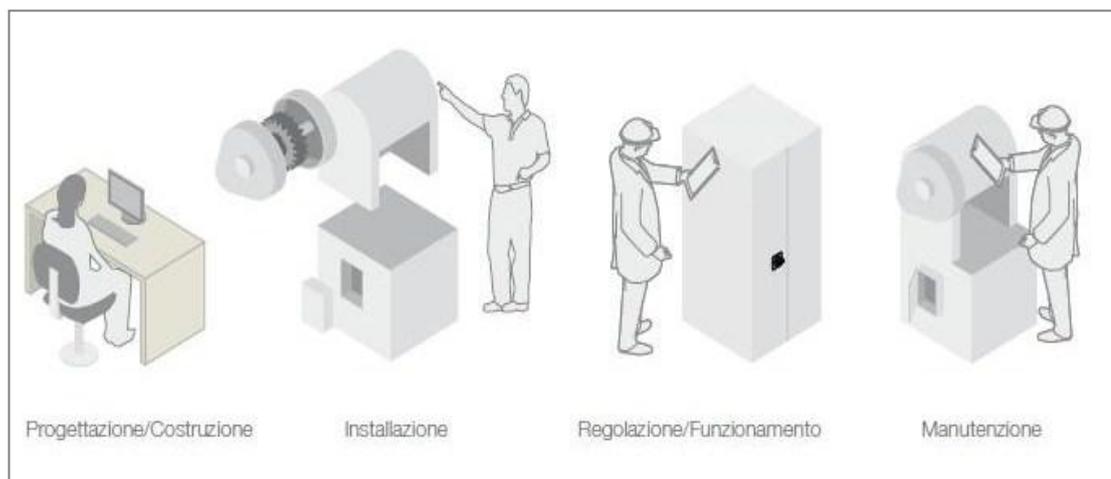
- UNI EN 12999 "Gru caricatrici"
- UNI EN 13000 "Gru mobili"
- UNI EN 13001-1 "Criteri generali per il progetto: principi e requisiti generali"
- UNI EN 13001-2 "Criteri generali per il progetto: azioni dei carichi"
- UNI CEN/TS 13001-3-1 "Criteri generali per il progetto: stati limite e verifica della sicurezza delle strutture di acciaio"
- UNI CEN/TS 13001-3-2 "Criteri generali per il progetto: stati limite e verifica di idoneità delle funi nei sistemi in taglia"

Capitolo 1

La sicurezza delle macchine

Oltre all'obbligo morale di evitare danni alle persone, la normativa impone macchine sicure. Esistono poi valide ragioni economiche per prevenire gli incidenti.

La sicurezza deve essere implementata a partire dalla progettazione e deve riguardare tutto il ciclo di vita di una macchina: progettazione, costruzione, installazione, regolazione, funzionamento, manutenzione e rottamazione.

Questi sono i principi basilari della direttiva europea 2006/42/CE, meglio conosciuta come direttiva macchine.

Macchine nuove: la Direttiva Macchine

La Nuova Direttiva Macchine 2006/42/CE è entrata in vigore dal 29 Dicembre 2009.

Essa stabilisce che i costruttori garantiscano i requisiti minimi di sicurezza per i macchinari e per le apparecchiature commercializzate liberamente all’interno dell’Unione Europea.

Le macchine devono adeguarsi ai requisiti fondamentali di salute e sicurezza elencati nella Direttiva, garantendo in tal modo un livello minimo di protezione e sicurezza comune per tutto il mercato europeo.

Prima di immettere sul mercato una nuova macchina i produttori o i loro rappresentanti autorizzati all’interno dell’EU devono garantire che la macchina sia conforme, rendere disponibile un fascicolo tecnico in caso di richiesta giustificata da parte di un’autorità, firmare una “Dichiarazione di Conformità” e apporre la marcatura CE.

Le norme riguardano tutti i lavoratori, dipendenti o autonomi, e tutti coloro che si occupano della verifica delle attrezzature e delle macchine.

Macchine esistenti: la direttiva sull’uso delle attrezzature da lavoro

La Direttiva 89/655/CE sull’uso delle attrezzature da lavoro è rivolta agli utilizzatori delle macchine ed è rispettata utilizzando macchine e macchinari conformi alle norme.

Riguarda l’utilizzo di tutte le attrezzature da lavoro, compresi macchinari di sollevamento e attrezzature mobili, in tutti i luoghi di lavoro.

Le attrezzature di lavoro devono essere adatte all’uso e garantire la sicurezza nel tempo, attraverso una corretta manutenzione.

Il costo degli incidenti

Alcuni costi sono evidenti, quali ad esempio l’assenza per malattia del personale infortunato, mentre alcuni costi sono più difficili da identificare. L’impatto finanziario sull’azienda è altissimo: l’aumento dei premi assicurativi, il calo della produzione, la perdita di clienti e della reputazione dell’azienda.

Alcune misure di riduzione del rischio possono effettivamente migliorare la produttività; l’utilizzo ad esempio di barriere fotoelettriche per proteggere i punti di accesso ai macchinari possono permettere un più veloce e sicuro carico e scarico, mentre l’installazione di dispositivi di sezionamento può permettere di isolare alcune parti della macchina, in caso di manutenzione, lasciando operative altre sezioni.
Inoltre si anche un costo sociale causato da infortuni o invalidità che finiscono a carico dello stato e quindi di tutta la società o nazione.

Le norme tecniche europee
Direttiva CE:

- Strumento legale utilizzato per armonizzare le legislazioni degli Stati membri dell’Unione Europea
- Stabilisce i requisiti essenziali per la salute e la sicurezza.
- Obbligo di trasposizione nella legislazione nazionale

Norma tecnica
Con il termine “norma” si intende una specifica tecnica approvata da un ente normativo riconosciuto a svolgere questa attività di formazione.

Norme armonizzate
Una norma diventa armonizzata quando viene pubblicata nella gazzetta ufficiale dell' Unione Europea ad approvata dal 51% degli stati membri.

Presunzione di conformità
Un prodotto costruito in conformità a una norma armonizzata europea (EN), che è stato pubblicato nella Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea per una specifica direttiva o tipo di macchinario, è presunto conforme ai requisiti essenziali di tale direttiva, fino a prova contraria. Risulta essere una autocertificazione del costruttore che se ne assume legalmente tutte le conseguenze, una volta che da un ente controllore venga verificata una non conformità.

Norme di tipo A, B e C

Le norme armonizzate in materia di Sicurezza Macchine si dividono in tre tipi come qui di seguito descritto:

- Norme di tipo A (norme base): contengono i concetti fondamentali, i principi di progettazione e gli aspetti generali applicabili a tutte le macchine;
- Norme di tipo B

(norme gruppo) trattano un aspetto specifico della sicurezza o un dispositivo di sicurezza.

Sono suddivise in due gruppi:

  - Tipo B1 : riguardano aspetti particolari della sicurezza (ad es. distanze di sicurezza, temperatura della superficie, rumore);
  - Tipo B2: riguardano i dispositivi di protezione (ad es. comandi a due dispositivi di interblocco delle protezioni);

- Norme di tipo C (norme per famiglie di macchine): trattano i requisiti di sicurezza per tipologia di macchina.

Quando una norma di tipo C devia da una o più disposizioni di una norma di tipo A o da una norma di tipo B, prevale la norma di tipo C.

Responsabilità del costruttore

I costruttori che immettono le macchine sul mercato europeo devono adeguarsi alle disposizioni previste dalla Direttiva Macchine.

Per “immissione sul mercato” si intende anche il caso di un’azienda che fornisce un macchinario a se stessa, per costruire o modificare macchine per proprio uso personale, o ancora l’importazione di macchine nell’ambito della Comunità Europea.

Responsabilità dell’utilizzatore

Spetta agli utilizzatori accertarsi che le nuove macchine acquistate abbiano la marcatura CE e siano accompagnate da una Dichiarazione di Conformità alla Direttiva.
Le macchine devono essere utilizzate secondo le istruzioni del fabbricante.
Le macchine esistenti in servizio prima dell'entrata in vigore della Direttiva Macchine sono tenute a garantire la conformità alle regolamentazioni della Direttiva sull'Uso delle Attrezzature di Lavoro (Direttiva Sociale).

Analisi del rischio (UNI EN 14121)

Affinché una macchina (o altra apparecchiatura) possa essere ritenuta sicura è necessario valutare attentamente i rischi che potrebbero derivare dal suo utilizzo.
Esistono molte tecniche di valutazione del rischio, ma nessuna può essere ritenuta la strategia migliore. La normativa specifica dà alcuni principi generali, ma non può indicare esattamente la procedura da seguire per ciascun caso specifico. Sarebbe auspicabile che la normativa potesse fornire un valore o 'punteggio' per ciascun rischio ed un valore ottimale massimo da non superare. Il punteggio assegnabile a ogni singolo rischio, oltre al livello di rischio tollerabile, dipende da una serie di analisi e può variare in funzione della persona incaricata o in base all'ambiente. I rischi che potrebbero, ad esempio, essere ragionevoli e tollerabili in un ambiente industriale, con personale specializzato, sarebbero al contrario inaccettabili in uno spazio pubblico con presenza di bambini.
L'analisi storica o statistica dei tassi di incidenti e infortuni può essere un indicatore utile, ma non può fornire un'indicazione affidabile sulle percentuali prevedibili di incidenti ed infortuni.

Definire i limiti della macchina

Cosa è importante valutare? Quali sono le velocità, i carichi, le sostanze, ecc. che possono essere coinvolte? Non si deve dimenticare di prevedere un uso errato o non idoneo (definito scorretto prevedibile), come ad esempio l'eventuale utilizzo di una macchina al di fuori delle specifiche tecniche. Per rispondere alla domanda di quale è l'aspettativa di vita di una macchina e dell'applicazione ad essa

correlata, bisogna prevedere in che modo rottamare la macchina al termine del suo ciclo di vita.

Identificare i rischi

Quali aspetti della macchina possono causare danni o lesioni a una persona? I pericoli da tenere in considerazione includono la possibilità di intrappolamento, schiacciamento, taglio con attrezzi e utensili, con bordi e spigoli vivi della macchina o con dei materiali lavorati.

Occorre inoltre considerare altri fattori quali stabilità della macchina, rumore, vibrazioni, emissione di sostanze tossiche o fumi, radiazioni, superfici calde, agenti chimici o velocità elevate. Questa fase deve includere tutti i rischi riscontrabili durante il ciclo di vita di una macchina, compresa la costruzione, l’installazione e lo smaltimento.

Qui di seguito si forniscono alcuni esempi di rischi tipici.

- Chi può subire lesioni o danni conseguenti ai rischi identificati e quando?

Chi interagisce con la macchina, quando e perché? Di nuovo si consiglia di verificare l’uso scorretto ragionevolmente prevedibile, compresa la possibilità di utilizzo di una macchina da parte di personale inesperto; non solo gli operatori ma anche il personale addetto alle pulizie, alla sicurezza o il pubblico.

- Stabilire un ordine di priorità in base dalla gravità del rischio.

La stima dei rischi può essere valutata considerando il danno potenziale che potrebbe derivare dal rischio in base all’esposizione al rischio stesso e il numero di persone esposte al pericolo.

Resta comunque difficile stimare il danno potenziale, ammettendo sempre la possibilità che qualsiasi incidente possa portare a danni con effetti irreversibili. Tuttavia anche nella maggior parte dei casi che presentano più di una possibile conseguenza, una sola è quella più probabile. Occorre sempre prendere in considerazione tutte le conseguenze plausibili, non solo il caso più grave. Il risultato del processo di Valutazione del rischio dovrà portare a una tabella dei vari rischi legati alla macchina con indicazione della gravità di ciascuno. Non esiste un unico “tasso di rischio” o un’unica “categoria di rischio” per una

macchina: ogni rischio deve essere considerato e valutato singolarmente. La gravità del rischio può essere solo stimata: la “valutazione dei rischi” non è una scienza esatta, l’obiettivo della Valutazione del rischio deve essere una corretta strategia di riduzione dei rischi.

Riduzione del rischio

La riduzione dei rischi è definita in termini di eliminazione e neutralizzazione del rischio (ovvero ridurre la probabilità che un danno o incidente possa accadere):
“le misure adottate devono avere lo scopo di eliminare ogni rischio durante l’esistenza prevedibile della macchina, incluse le fasi di trasporto, montaggio, smontaggio, smantellamento messa fuori servizio e rottamazione.”
Come regola generale, se un rischio può essere ridotto è necessario adottare tutte le possibili misure per ridurlo. Questo compatibilmente con ogni singola realtà economica aziendale; le norme utilizzano termini quali “ragionevole” per indicare che potrebbe esistere la possibilità che alcuni rischi non siano eliminabili senza interventi economicamente molto gravosi.
La valutazione dei rischi è un processo interattivo che deve essere realizzato in diverse fasi del ciclo di vita della macchina: i rischi devono essere identificati, gestiti secondo un ordine di priorità, quantificati, adottando misure opportune per eliminare i pericoli o ridurre i rischi connessi con misure opportune (per prima cosa con una costruzione sicura, quindi con l’adozione di misure tecniche di sicurezza). Questo processo dovrà quindi essere ripetuto per valutare se e in che

modo i singoli rischi siano stati ridotti a un livello accettabile, accertandosi che non siano stati introdotti rischi ulteriori.

Di seguito si riportano le linee guida per la progettazione e costruzione sicura e l'adozione delle misure di sicurezza.

Concetto di costruzione sicura

Alcuni rischi possono essere evitati adottando semplici misure; è possibile eliminare all'origine il rischio? Talvolta è possibile eliminare il rischio automatizzando alcune operazioni quali ad esempio il carico della macchina.

Ad esempio l'utilizzo di un solvente non infiammabile per le operazioni di pulizia dei macchinari può evitare i rischi di incendio causati da sostanze infiammabili.

Questa fase viene definita con il termine di “costruzione conforme ai principi di progettazione sicura” e rappresenta l’unico modo per azzerare il rischio.
Togliere la trasmissione dal rullo terminale di un trasportatore permette di ridurre la possibilità che qualcuno venga intrappolato. Sostituire le pulegge a raggi con dischi lisci consente di ridurre i rischi di taglio. Eliminare bordi e spigoli taglienti, angoli o sporgenze consente di evitare tagli ed ecchimosi. L’aumento delle distanze minime dalla macchina può permettere di evitare lo schiacciamento di parti del corpo. La limitazione di forze, velocità e pressioni può ridurre il rischio di lesioni.
Occorre fare attenzione a evitare di sostituire un rischio con un altro. Gli utensili alimentati ad aria permettono ad esempio di evitare i rischi legati all’elettricità, ma possono implicare altri rischi legati all’uso dell’aria compressa, quali l’iniezione d’aria e il rumore del compressore.

Misure tecniche di sicurezza e dispositivi di protezione aggiuntivi

Ove non sia possibile la costruzione conforme a principi di progettazione sicura, il passo successivo è l’adozione di misure tecniche di sicurezza. Queste possono prevedere ad esempio l’installazione di ripari fissi o mobili, rilevatori di presenza per evitare avviamenti inattesi, ecc.
Le misure tecniche di sicurezza devono impedire a chiunque l’accesso o il contatto involontario con un elemento pericoloso che implica un rischio di lesione personale, oppure ridurre il rischio portandolo ad uno stato sicuro prima che la persona possa entrare in contatto con esso.
I ripari possono essere fissi per limitare o mantenere la distanza da un pericolo, o mobili interbloccati o regolabili manualmente o automaticamente.

I dispositivi di protezione utilizzati per creare un sistema di sicurezza comprendono:

- Dispositivi di interblocco che rilevano e controllano la posizione dei ripari mobili: utilizzati generalmente per consentire le operazioni di carico e scarico, pulizia, impostazione, regolazione, ecc. La protezione degli

operatori è assicurata dall'arresto della macchina quando l'attuatore è fuori dalla testa dell'interruttore, quando la leva o il pistone è attivato, quando il riparo è aperto o la cerniera del riparo è ruotata di 5° , generalmente su macchine a bassa inerzia (ad esempio con tempi di arresto rapidi).

- Barriere fotoelettriche di sicurezza per il rilevamento degli accessi alle zone pericolose
  - Rilevamento dita, mani o corpo (capacità di rilevamento fino a 14mm, fino a 30mm e oltre 30mm).

    Le barriere fotoelettriche di sicurezza vengono utilizzate generalmente nelle applicazioni di movimentazione materiali, confezionamento e imballaggio, nastri trasportatori, immagazzinaggio ecc. Le barriere sono sensori di presenza fotoelettrici concepiti specificatamente per proteggere il personale dai movimenti pericolosi delle macchine. Sono perfette per le applicazioni in cui il personale necessita di accedere frequentemente a un punto di lavoro pericoloso. L'assenza di porte o schermi di protezione facilita l'accesso riducendo i tempi necessari alle operazioni di carico, ispezione o regolazione, pur garantendo un livello di sicurezza ottimale e un'elevata produttività.

- Tappeti di sicurezza sensibili alla pressione
  - Rilevamento avvicinamento o stazionamento nell'area pericolosa.

    I tappeti o pedane sensibili alla pressione sono spesso usati davanti o intorno ad un'area con macchine o robot potenzialmente pericolosi. Servono a proteggere l'area intorno alla macchina, impedendo movimenti pericolosi se l'operatore si avvicina dalla zona pericolosa. Sono concepiti per garantire la sicurezza del personale e vengono spesso associati alle barriere fotoelettriche per consentire il libero accesso per operazioni di carico e scarico delle macchine. Non

impediscono l'accesso, ma si attivano quando lo rilevano: la pressione esercitata sul tappeto interrompe il movimento pericoloso.

- Interruttori di sicurezza con elettroserratura (bobina) per prevenire l'apertura delle protezioni mobili
  - Per le fasi pericolose, a differenza degli interruttori senza blocco, gli interruttori con bobina sono utilizzati su macchine con inerzia elevata, ad esempio con tempi di arresto lunghi e sono consigliati per il controllo degli accessi previo arresto del movimento pericoloso. Sono spesso utilizzati con i moduli Preventa temporizzati (con tempi di arresto macchina definiti) o di rilevamento velocità nulla (con tempi di arresto variabili) per consentire l'accesso solo quando sono soddisfatte le condizioni di sicurezza.

    La scelta e l'installazione degli interruttori di sicurezza deve consentire di ridurre al minimo la possibilità di guasto ed errore, mentre il dispositivo di protezione non deve impedire le lavorazioni e la produzione.

    Per raggiungere questo obiettivo sono necessari:
    - dispositivi di protezione fissati solidamente (il loro montaggio/smontaggio o regolazione deve richiedere un utensile);
    - dispositivi o sistemi bloccati codificati per l'interblocco del comando o dell'alimentazione (meccanico, elettrico, magnetico o ottico);
    - impedimento fisico o schermo di protezione per prevenire l'accesso al dispositivo di interblocco con riparo aperto;
    - il supporto dei dispositivi deve essere sufficientemente rigido per assicurare il loro corretto funzionamento.

- Pulpito di comando a due mani e interruttori a pedale
  - Evitano all'operatore l'accesso a una macchina mentre questa si trova in una condizione pericolosa (es. comando presse).

Il comando a due mani protegge solo la persona che lo usa. L'operatore protetto deve essere in grado di osservare tutta l'area di accesso al pericolo. Per la protezione del resto del personale è necessario prevedere altre misure di sicurezza quali ad esempio l'installazione di barriere fotoelettriche.

- Comando ad azione mantenuta per accesso in condizioni specifiche di rischio ridotto.
  - Permettono all'operatore di accedere a un'area pericolosa in caso di operazioni di ricerca guasti, manutenzione, messa in servizio, ecc. (ad es. manovra ad impulsi). Sono dotati di interruttori a tre posizioni: attivati in posizione centrale e disattivati nelle altre due posizioni (rilasciato o completamente premuto).

Monitoraggio dei segnali di sicurezza: i sistemi di controllo

I segnali emessi dai dispositivi di sicurezza in campo vengono generalmente monitorati con componenti quali moduli di sicurezza, configuratori o PLC di sicurezza (definiti "dispositivi logici di sicurezza"), che vengono utilizzati per comandare (e talvolta monitorare) i dispositivi di uscita quali i contattori.

La scelta di un dispositivo logico dipende da molti fattori tra i quali il numero di ingressi di sicurezza da elaborare, il costo, la complessità delle funzioni di sicurezza, dall'esigenza di ridurre il cablaggio con un bus di campo quali AS-Interface Safety at Work o Safe Ethernet, o infine dalla necessità di inviare segnali/dati di sicurezza su lunghe distanze attraverso macchine di grandi dimensioni o tra macchinari in siti particolarmente estesi. L'attuale diffuso utilizzo di dispositivi elettronici complessi e software nei controllori o PLC di sicurezza ha in parte influenzato l'evoluzione delle normative in materia di sicurezza relative ai sistemi di controllo.

La funzione di protezione prevede generalmente l'utilizzo di un sistema di comando e controllo, relativamente al quale la Direttiva Macchine indica diversi requisiti prestazionali.

In particolare la norma specifica che "i sistemi di comando devono essere progettati e costruiti in modo da evitare l'insorgere di situazioni pericolose". La Direttiva Macchine non chiede in modo specifico l'applicazione di uno standard; tuttavia l'utilizzo di un sistema di comando conforme ai requisiti delle norme armonizzate è un modo per dimostrare la conformità al requisito della Direttiva Macchine.

Esempio 1: sistema Elettronico Tecs 2700 (per Paesi CE)

E' un sistema elettronico per il controllo e la protezione delle condizioni di carico della gru. Attraverso l'uso di sistemi a microprocessore effettua il monitoraggio della gru, del jib, del verricello e del radiocomando.

- E' possibile effettuare cambiamento di classe di sollevamento da H1B3 a H2B3 (benne o polipi);
- E' possibile contare le ore totali di servizio o di noleggio.
- Può monitorare una gru allestita con PLE.
- Individua eventuali guasti sulla Valvola di Emergenza e sulla Valvola di Limitatore di Carico;
- In caso di sovraccarico una indicazione sul display ed una luminosa indicano quale parte della gru è andata in sovraccarico: gru, jib, o verricello;

- Gestisce aree diverse di carico (anteriore al camion o posteriore) riducendo la percentuale di carico;
- In presenza di una cella di carico è possibile visualizzare sul display il peso e gestire di conseguenza anche le prolunghe meccaniche;
- Segnala in automatico i cicli di manutenzione periodica;
- E' possibile scegliere la lingua con la quale dialogare con il computer (inglese/italiano/francese/spagnolo ecc., fino ad un numero di 8).

Esempio 2: Sistema Elettronico CSS

Il sistema CSS è un sistema elettronico di supervisione delle funzioni e delle prestazioni della gru che ne permette l'utilizzo, sempre al massimo della capacità. Un computer gestisce tutte le valvole ed il distributore controllando la portata di olio di lavoro a seconda del tipo di operazione che la gru sta effettuando. E' presente un sistema di anti-ribaltamento che consente, attraverso l'ausilio di alcune bolle di livello, di gestire in automatico la movimentazione del carico monitorando l'inclinazione del veicolo nei suoi assi principali. Il CSS controlla inoltre l'interblocco piedi/gru attraverso una bolla di livello digitale, impedendo la movimentazione dei piedi quando la gru è in fase di lavoro.

Il sistema CSS permette di sfruttare al massimo le capacità di lavoro della gru assolvendo alle stesse funzioni del sistema HPV.

Tra le altre funzioni del CSS: controllo dell'inserimento del radiocomando, controllo dell'inserimento del jib, controllo dell'inserimento del PLE, funzione pesatura, controllo cicli di manutenzione, avviso avarie. Inoltre mantiene in memoria tutti i dati di lavoro della gru come una scatola nera gestendo anche la diagnostica e la risoluzione di alcuni difetti o rotture del sistema o dei sensori (diagnostica facilitata in caso di avaria).

Misure di protezione e dispositivi complementari: arresti di emergenza

Malgrado i dispositivi di arresto d'emergenza siano richiesti per qualsiasi tipo di macchina (la Direttiva Macchine prevede due eccezioni specifiche) la norma li considera "apparecchiature di protezione complementari". Poiché non impediscono e non rilevano l'accesso a un pericolo, non sono considerati dispositivi di protezione primari. Sono generalmente usati per proteggere le persone e le macchine solo in caso di pericoli improvvisi ed emergenze.

Devono essere robusti, affidabili e immediatamente accessibili e disponibili sia in tutte le modalità di funzionamento della macchina che in tutte le posizioni in cui possa essere necessario azionarli.

Gli arresti sono suddivisi in tre categorie:

– Categoria 0: arresto con immediata apertura dell'alimentazione degli attuatori della macchina (arresti non controllati);

– Categoria 1: arresto con alimentazione disponibile affinché gli attuatori della macchina eseguano l'arresto; l'alimentazione viene rimossa dopo l'arresto;

– Categoria 2: arresto comandato con alimentazione disponibile per gli attuatori della macchina, anche dopo l'arresto.

La Categoria 2 non è generalmente considerata adatta ad un arresto d'emergenza.

Rischi residui

Dopo aver eliminato o ridotto i rischi il più possibile attraverso la progettazione e costruzione di macchine intrinsecamente sicure e con l'installazione dei sistemi e delle misure di protezione necessari, il processo di valutazione dei rischi deve essere ripetuto per verificare che non siano stati introdotti nuovi rischi (ad esempio l'installazione di ripari mobili può implicare rischi di schiacciamento) e per valutare se ciascun rischio sia stato ridotto entro limiti tollerabili. Tuttavia pur ripetendo più volte il processo interattivo di valutazione e riduzione dei rischi può accadere facilmente che sussistano rischi residui.

Ad eccezione delle macchine costruite in conformità con una norma di tipo C (automatica presunzione di conformità con i requisiti essenziali di sicurezza e salute) spetta al progettista giudicare il livello di tollerabilità del rischio residuo o le eventuali ulteriori misure da prendere, fornendo informazioni ed indicazioni specifiche riguardo ai rischi residui sotto forma di iscrizioni e/o targhe con le istruzioni per l'uso, ecc. Le istruzioni dovranno altresì specificare le misure da adottare, quali ad esempio i dispositivi di protezione personale (DPP) o procedure operative particolari, anche se queste ultime non saranno mai affidabili quanto le misure implementate direttamente dal progettista della macchina.

Esempio di conseguenza di manomissione degli impianti di sicurezza:

TGA 32.410
Geir V. Johansen

TGA 32.410
Geir V. Johansen

Capitolo 2
Cenni sulle normative

Le normative di prodotto Europee EN sono specifiche tecniche elaborate e approvate dal CEN (European Committee for Standardization).
Le norme di prodotto si riferiscono alle caratteristiche squisitamente tecniche e definiscono le condizioni generali di fornitura e i livelli di accettazione.
I criteri con cui sono state fatte rispondono ai requisiti del mercato in uno specifico campo di applicazione e sono congruenti con eventuali Direttive Europee che le coinvolgano.
Esempi di impieghi sono strutturali, meccanici, pressione , trasporto gas, acqua, ecc.
Le Direttive Europee, invece, sono disposti emanati dalla Commissione Europea per specifici settori di applicazione che devono essere recepiti dai singoli Stati Membri nel loro sistema legislativo nazionale. Con esse vengono normalmente fissati i requisiti essenziali senza definire nel dettaglio elementi tecnici specifici.
Quando le norme recepiscono i requisiti essenziali di una Direttiva sono chiamate Norme Armonizzate e gli estremi vengono pubblicati sulla Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea.
I prodotti direttamente interessati devono essere collocati sul mercato solo se congruenti con i requisiti essenziali.
Una norma entra ufficialmente in vigore quando gli Enti nazionali di Unificazione (UNI, DIN, AFNOR, ecc.) hanno l'obbligo di recepire la norma entro 6 mesi dalla data di approvazione del CEN. Le norme vengono pubblicate

in lingua ufficiale della CE (inglese, francese, tedesco) ed eventualmente tradotti dai singoli Enti Nazionali come DIN EN xxx, UNI EN xxx ecc. e sostituiscono la norma nazionale precedente, se esistente. Le Norme nazionali sostituite vengono ritirate.

La motivazione dell’impiego della norme EN è dato dal fatto che, nel caso di norme non armonizzate (quindi non legate a Direttive), esse rappresentano il riferimento tecnico più aggiornato nello specifico campo di applicazione, con esse i materiali sono uguali in tutta la Comunità Europea ed infine perché le norme precedenti sono state ritirate.

Nel caso, invece, di norme armonizzate (quindi legate a Direttive Europee) la giustificazione è dovuta al fatto che esse garantiscono conformità ai requisiti essenziali richiesti, senza ulteriori costose certificazioni.

L'implementazione progressiva delle EN permette la graduale sostituzione delle eventuali giacenze di materiali prodotti con le norme sostituite. In ogni caso, recependo il prima possibile le EN si riduce il rischio di giacenze obsolete.

Le norme EN armonizzate soddisfano i requisiti essenziali oltre ad abbattere le barriere tecniche e creare le condizioni per un mercato interno unico.

<table>
<tr><th colspan="2">NORME EUROPEE</th></tr>
<tr><td>EN ARMONIZZATE</td><td>EN</td></tr>
<tr><td colspan="2">Preparate per la disciplina dei settori di mercato</td></tr>
<tr><td>SOGGETTE E DIRETTIVE</td><td>NON SOGGETTE E DIRETTIVE</td></tr>
<tr><td>STUDIATE SU MANDATO DELLA COMMISSIONE</td><td>STUDIATE SU RICHIESTA DI UNA O PIU’ COMPONENTI DI MERCATO</td></tr>
<tr><td colspan="2">CONTENGONO REQUESITI TECNICO-STRUTTURALI NECESSARI A SOFDDISFARE LE VARIE ESIGENZE DEL MERCATO E DEI SUOI OPERATORI</td></tr>
<tr><td colspan="2">DEFINISCONO IL PRODOTTO/SERVIZIO IN OGNI SUO ASPETTO,</td></tr>
</table>

COMPRESE LE PRESCRIZIONI DI FABBRICAZIONE, DI RISPONDENZA CHIMICA-FISICO-MECCANICA, DI CONTROLLO, DI FORNITURA E QUINDI DI FUNZIONALITA' PER L'USO/APPLICAZIONE PREVISTO	
CONTENGONO LE PRESCRIZIONI PER IL SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI ESSENZIALI	
RECEPITE DA TUTTI I PAESI DELLA COMUNITA'	

I materiali che possono essere utilizzati sono quelli conformi a:

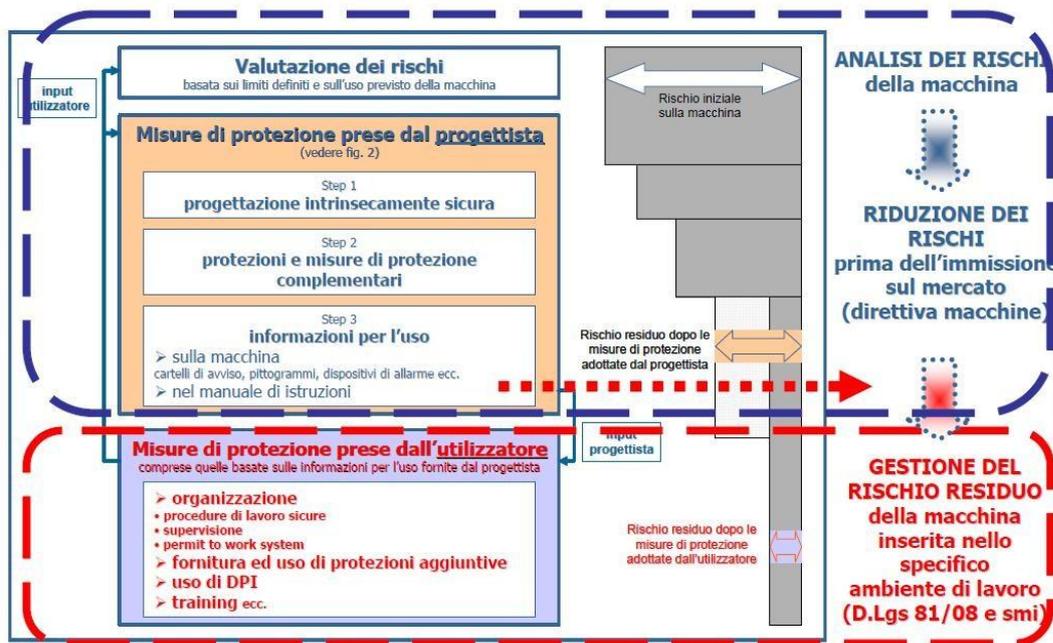
- Norme EN armonizzate
- Materiali sottoposti a Benestare Tecnico Europeo.

Il Benestare tecnico europeo è una valutazione d'idoneità di un prodotto per l'impiego previsto, fondata sulla corrispondenza ai requisiti essenziali, rilasciato da un Organismo competente a livello europeo (notificato), su richiesta del fabbricante o del suo mandatario stabilito nella Comunità.

E' necessario anche il **marchio CE**, che identifica i prodotti conformi alla CPD[1] e che si accompagna alla normale certificazione di fabbrica.
L'applicazione del marchio CE è responsabilità del fabbricante.
Il marchio CE deve essere apposto dal fabbricante su un'etichetta apposta sul prodotto e sui documenti commerciali di accompagnamento.
Di fatto, rende riconoscibili i prodotti idonei/conformi alla CPD e che solo così possono essere immessi sul mercato.
Tale marchio consiste nel simbolo CE accompagnato:
- dal nome o dal marchio del produttore e, se del caso:
- da indicazioni atte a identificare le caratteristiche del prodotto, in funzione delle specifiche tecniche,

[1] La **CPD** (construction products) è la Direttiva Europea che armonizza le disposizioni legislative, regolamentari e amministrative degli Stati membri nel settore delle costruzioni.

- dalle ultime due cifre dell'anno di fabbricazione,
- dal simbolo di identificazione dell'organismo di ispezione interessato,
- dal numero del certificato CE di conformità.

Più in particolare, per progettazione e costruzione, le macchine devono essere atte a funzionare, a essere azionate, a essere regolate e a subire la manutenzione senza che tali operazioni espongano a rischi le persone, se effettuate nelle condizioni previste tenendo anche conto dell'uso scorretto ragionevolmente prevedibile.
Le misure adottate devono avere lo scopo di eliminare ogni rischio durante l'esistenza prevedibile della macchina, comprese le fasi di trasporto, montaggio, smontaggio, smantellamento (messa fuori servizio) e rottamazione.
I requisiti essenziali elencati nella direttiva sono inderogabili.

Tuttavia, tenuto conto dello "stato della tecnica", gli obiettivi da essi prefissi possono non essere raggiunti. In questo caso e nella misura del possibile la macchina deve essere progettata e costruita per tendere verso tali obiettivi.

I requisiti dovranno essere applicati con discernimento per tenere conto del livello tecnologico esistente al momento della costruzione nonché degli imperativi tecnici ed economici.
Con queste osservazioni, si ammette la presenza di un "rischio residuo" sulla macchina (rischio residuo>0).
I requisiti essenziali di sicurezza e di tutela della salute sono inderogabili; tuttavia, tenuto conto dello stato dell'arte, gli obiettivi da essi prefissi possono non essere raggiunti.
In tal caso la macchina deve, per quanto possibile, essere progettata e costruita per tendere verso questi obiettivi.
Per corrispondere allo stato dell'arte, le soluzioni tecniche adottate per soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza e di tutela della salute devono ricorrere ai mezzi tecnici più efficaci disponibili al momento e a costi ragionevoli, tenuto conto del costo totale della categoria di macchine in questione e della necessaria riduzione del rischio.
I fabbricanti di macchine non sono tenuti ad adottare soluzioni tecniche che siano ancora in fase di ricerca o mezzi tecnici non comunemente disponibili sul mercato.
D'altro canto, essi devono tener conto del progresso tecnico e adottare le soluzioni tecniche più efficaci e adeguate alla macchina in questione, quando queste sono disponibili a costi ragionevoli.
"Lo stato dell'arte" è pertanto un concetto dinamico: esso evolve quando diventano disponibili mezzi tecnici più efficaci o quando diminuisce il relativo costo. Pertanto, una soluzione tecnica che si considera soddisfi i requisiti essenziali di sicurezza e di tutela della salute della direttiva in un dato momento può essere considerata inadeguata successivamente, nel caso si registrino degli sviluppi nello stato dell'arte.
Le norme armonizzate forniscono le specifiche tecniche che consentono ai fabbricanti di macchine di conformarsi ai requisiti essenziali di sicurezza e di tutela della salute.

Poiché le norme armonizzate sono sviluppate e adottate sulla base del consenso fra le parti interessate, le loro specifiche danno una buona indicazione dello stato dell'arte al momento della loro adozione.
L'evoluzione dello stato dell'arte si riflette nelle modifiche o revisioni successive delle norme armonizzate.
Il fabbricante che sceglie soluzioni alternative deve poter dimostrare che tali soluzioni sono conformi ai requisiti essenziali di sicurezza e di tutela della salute della direttiva macchine, tenuto conto dell'attuale stato dell'arte. Di conseguenza, tali soluzioni alternative devono fornire un livello di sicurezza che sia per lo meno equivalente a quello ottenuto applicando le specifiche della norma armonizzata pertinente.
Qualora non siano disponibili le norme armonizzate, altri documenti tecnici possono fornire utili indicazioni per l'applicazione dei requisiti essenziali di sicurezza e di tutela della salute della direttiva macchine. Fra tali documenti si annoverano, ad esempio, le norme internazionali, le norme nazionali, i progetti di norma europea, le "*Raccomandazioni per l'uso"* formulate dal coordinamento europeo degli organismi notificati.
Tuttavia, l'applicazione di tali documenti tecnici non conferisce una presunzione di conformità ai requisiti essenziali di sicurezza e di tutela della salute della direttiva macchine.

Alcune tappe fondamentali per l'integrazione della sicurezza nelle macchine e impianti di sollevamento sono:

- Controllo delle sollecitazioni e stabilità
- Evoluzione e consolidamento dello Stato dell'Arte
- Direttiva macchine e norme armonizzate

Rischi dovuti alla mancanza di stabilità

La macchina deve essere progettata e costruita in modo che la stabilità sia mantenuta sia in condizioni di servizio che fuori servizio, incluse tutte le fasi di trasporto, montaggio e smontaggio, in caso di guasti prevedibili di componenti e

durante le prove effettuate in conformità del manuale di istruzioni. A tal fine il fabbricante o il suo mandatario deve utilizzare i metodi di verifica appropriati.

Le misure da adottare per garantire la stabilità della macchina, conformemente ai principi di integrazione della sicurezza, concernono in primo luogo la stabilità intrinseca della macchina.

Secondo, laddove persiste il rischio di perdita della stabilità, si dovranno installare i necessari dispositivi e attrezzature di protezione per evitare che la macchina si ribalti o si rovesci. A tal proposito, il fabbricante deve considerare l’uso scorretto prevedibile della macchina che potrebbe comportare il rischio di ribaltamento o rovesciamento.

Le necessarie misure di protezione possono comprendere, ad esempio, la dotazione di stabilizzatori, limitatori di velocità, dispositivi di controllo della posizione, dispositivi di rilevazione del sovraccarico e del momento e dispositivi di rilevamento dell’inclinazione.

Terzo, per i rischi residui che non possono essere completamente eliminati da questi dispositivi, si dovranno fornire se necessari degli indicatori adeguati quali, ad esempio, tachimetri, inclinometri e anemometri, oltre alle informazioni**,** avvertenze e istruzioni necessarie affinché gli operatori possano evitare le situazioni che potrebbero portare a un ribaltamento o rovesciamento della macchina durante le varie fasi della sua esistenza.

Sollevamento Materiali e Controllo delle sollecitazioni

Le macchine con un carico massimo di utilizzazione pari almeno a 1000 kg o il cui momento di rovesciamento è pari almeno a 40.000 Nm devono essere dotate di dispositivi che avvertano il conducente e impediscano i movimenti pericolosi in caso:

- di **sovraccarico** sia per eccesso di carico massimo di utilizzazione, sia per superamento del momento massimo di utilizzazione dovuto a tale carico, o
- di **superamento del momento di rovesciamento**.

Il punto sopra descritto tiene conto del fatto che alle condizioni d'uso prevedibili l'operatore non possa valutare correttamente il peso del carico da sollevare, che possa cercare di sollevare un carico eccessivamente pesante o sollevare il carico fino a una posizione che determinerà la perdita di stabilità.

Questo requisito ha quindi lo scopo di evitare tale uso scorretto prevedibile della macchina.

La scelta dei dispositivi di protezione dipende dalla categoria e dalle caratteristiche della macchina. Per la maggior parte delle categorie di macchine di sollevamento, i dispositivi con cui attrezzare la macchina sono specificati nelle norme armonizzate pertinenti.

In generale, i dispositivi di controllo del carico e del momento devono poter misurare o calcolare i pertinenti parametri quali, ad esempio, il peso del carico, la posizione del carico e il momento di rovesciamento prodotto dal carico. I dispositivi devono trasmettere un segnale di allarme all'operatore prima che siano raggiunti il carico d'utilizzazione massimo o il momento di rovesciamento, in modo che egli possa intervenire ed evitare il sovraccarico della macchina o di spostare il carico in una posizione che può determinare il rovesciamento della macchina. I dispositivi di protezione devono essere integrati nel sistema di comando in modo tale da impedire che la macchina o il carico compiano movimenti pericolosi se viene superato il carico d'utilizzazione massimo o il

momento di rovesciamento. Possono essere ammessi movimenti della macchina non pericolosi.

GRU CARICATRICI:

controllo stabilità

EN 12999:2011 Loader cranes

"For cranes with a rated capacity of 1 000 kg or above, or a maximum net lifting moment of 40 000 Nm or above, the stability of the vehicle shall be included in the safety function of the rated capacity limiter".

(Per le gru con carico nominale uguale o maggiore di 1000 kg , o con un momento di sollevamento netto uguale o maggiore di 40000 Nm, la stabilità del veicolo deve essere inclusa nella funzione di sicurezza del limitatore di carico).

Per stabilità in questo caso si intende:

"lo sfilamento di ciascuno stabilizzatore è monitorato dal limitatore di carico e, se esso non è completamente sfilato, il carico nominale viene ridotto oppure la gru viene arrestata".

Questo requisito non si applica alle gru caricatrici forestali.

Le prestazioni di una gru dipendono fondamentalmente da 2 fattori:

1. La stabilità
2. La resistenza dei materiali

Nel corso degli anni si è assistita ad un'evoluzione delle macchine in relazione alle esigenze via via crescenti degli operatori.

Le prime gru erano di fatto macchine molto pesanti al fine di garantire il sollevamento del carico senza l'utilizzo di stabilizzatori.

Un tempo gli operatori conoscevano esattamente quanto potevano sollevare, poiché operavano senza sistemi di controllo automatici, ma dovevano "sentire" il carico tramite la gru.

In seguito, la necessità di avere bracci più lunghi ha richiesto lo sviluppo degli stabilizzatori.

Gli stabilizzatori di prima generazione erano progettati per sollevare anche le ruote del mezzo su cui erano alloggiati.
Sono comparsi poi stabilizzatori in doppia testata e doppia posizione, attualmente in uso, nei quali due travi telescopiche in due testate individuali garantiscono un’apertura grande più del doppio della larghezza del telaio.
A livello concettuale, aumentando la larghezza degli stabilizzatori, ammesso che questi sia sufficientemente robusti, si può sollevare qualsiasi cosa.
Grande importanza ha la resistenza del materiale.
Una leva lunga richiede un braccio più robusto, resistenza meccanica superiore, e stabilizzatori adeguati per evitare rotture.
Come anticipato poco fa, le portate di sollevamento dipendono quindi da 2 elementi, quali l’ampiezza degli stabilizzatori e la resistenza del materiale.
La stabilità e definita come la capacità di una gru di resistere al ribaltamento.
In generale, se una gru perde stabilità è perché l’ampiezza degli stabilizzatori è limitata dalla resistenza dei materiali. Anche lo sbraccio e il peso della macchina sono fattori che incidono sulla stabilità.
Per migliorare la sicurezza è stato introdotto nel 1996 con il Decreto di Recepimento della Direttiva Macchine, l’obbligo di installazione del **limitatore di momento di carico** per le macchine marcate CE.
Il limitatore di momento di carico blocca le funzioni della gru all’approssimarsi delle condizioni critiche di stabilità o strutturali nelle diverse situazioni di lavoro.
I sistemi adottati dai costruttori consistono di un display grafico che permette all’operatore di visualizzare in ogni momento posizione ed entità del carico (sollevato e permesso).
Il limitatore di momento di carico è
costituito da:

- Display in cabina
- Sistema anti-doppio bloccaggio in punta al braccio
- Misuratore inclinazione e lunghezza del braccio
- Trasduttori di pressione sul braccio
- Unità centrale di processo in cabina dietro al sedile operatore

TENSIONE
24 V

Capitolo 3
Verifica a fatica secondo le norme DIN

Le norme DIN alle quali è prevalentemente stato fatto riferimento per la precedente verifica sono di seguito riportate:

- **DIN 15018** (parte 1°, 2° e 3°)**:** tratta gli acciai utilizzati ed il calcolo delle tensioni ammissibili, sia nel caso statico che in quello dinamico;
- **DIN 4114** (parte1 e 2): per la verifica all’imbozzamento delle sezioni più critiche e per il calcolo a carico di punta dei martinetti;
- **DAST Richtlinie 011:** norma specifica per gli acciai StE690 e simili;

La verifica a fatica, ai fini della sicurezza a rottura per sollecitazioni variabili nel tempo e frequentemente ripetute, si deve eseguire per un numero di cicli di sollecitazione superiore a $2 \cdot 10^4$.
Le tensioni ammissibili sono uguali per ogni gruppo di sollecitazione e dipendono dalla famiglia di tensioni e dal numero di cicli di sollecitazione. Tale normativa prevede anche che si vada a ridurre la tensione ammissibile del materiale, invece che amplificare le sollecitazioni. Alle diverse fasce di cicli di sollecitazione e alle famiglie di tensioni sono associati gruppi di sollecitazioni secondo la tabella seguente.

Tabella 1 Gruppi di sollecitazione in funzione delle fasce di cicli di sollecitazione e delle famiglie di tensioni

Fascia di cicli di sollecitazione	**N 1**	**N 2**	**N 3**	**N 4**
Numero complessivo dei cicli di sollecitazione previsti	Oltre $2 \cdot 10^4$ Fino $2 \cdot 10^5$ Uso occasionale non regolare con lunghi periodi di pause	Oltre $2 \cdot 10^5$ Fino $6 \cdot 10^5$ Uso regolare in servizio intermittente	Oltre $6 \cdot 10^5$ Fino $2 \cdot 10^6$ Uso regolare in servizio continuo	Oltre $2 \cdot 10^6$ Uso regolare in servizio continuo gravoso
Famiglia di tensioni	**Gruppi di sollecitazione**			
S_0 molto leggero	B1	B2	B3	B4
S_1 leggero	B2	B3	B4	B5
S_2 medio	B3	B4	B5	B6
S_3 pesante	B4	B5	B6	B6

I gruppi di sollecitazioni da B1 a B6 sono associati a gruppi determinati di cicli di sollecitazione e a determinate famiglie di tensioni.

Man mano che il gruppo di sollecitazione aumenta di livello, le tensioni ammissibili si riducono progressivamente.

Oltre al gruppo di sollecitazione, i parametri da cui dipendono le tensioni ammissibili sono:

1. tipo di materiale;
2. condizione del materiale:
    - W0 = materiale base;

- K0 = giunto saldato (con saldatura controllata);
- K1 = giunto saldato (con saldatura non controllata);

3. tipo di sollecitazione, dipendente dal fatto che sia di trazione o compressione;
4. coefficiente χ, pari al rapporto tra le tensioni σ massima e minima: $\chi = \frac{\sigma_max}{\sigma_min}$.

Nella norma DIN 15018 sono rappresentati i più diffusi tipi di giunti saldati, classificati nei diversi casi di intaglio (da W0 a W2 e da K0 a K4), in base all'influenza più o meno rilevante degli intagli dipendente dalla forma, dalle modalità di costruzione, dalla foratura e dal tipo e qualità dei cordoni delle saldatura.

Ognuno di questi casi considera la diminuzione della resistenza a fatica al crescere dell'effetto di intaglio.

I coefficienti di intaglio considerati nella verifica delle sezioni di questa gru sono tutti uguali a W0 (per il materiale base), a K0 (giunto saldato e verificato mediante raggi X o liquidi penetranti) e a K1 (giunto saldato non verificato).

Nella verifica delle gru si ha generalmente a che fare con sollecitazioni composte, ovvero la combinazione di sollecitazioni di tipo σ e di tipo τ.

Per calcolare la tensione equivalente (= $\sigma_{id.}$) si utilizza il criterio classico di Von Mises:

$$\sigma_{ideale} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 - \sigma_X\sigma_Y + 3\tau_{XY}^{\ 2}} < \sigma_{amm}.$$

In generale, nella verifica delle gru, in particolare nelle sezioni caratteristiche dei vari sfili del pacco bracci, si ha a che fare con tensioni normali σ, generate da momento flettente e sforzo normale, e con una tensione tangenziale τ, dovute a momento torcente e taglio.

Poiché la "σ_Y" risulta nulla, per il calcolo della tensione ideale è conveniente utilizzare la formula semplificata della teoria di Von Mises:

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^{\ 2}} < \sigma_{amm}.$$

La normativa DAST Richtlinie 011 permette poi di ricavare le tensioni ammissibili, in funzione del materiale e del coefficiente χ.

In caso di sollecitazioni puramente tangenziali, si considera direttamente: $\tau \leq \sigma_{amm} / \sqrt{3}$

Classificazione della gru e dei carichi

La DIN 15018 considera le gru_400 e _430 appartenenti alla classe di sollevamento H1, la quale indica il tipo di ciclo di carico a fatica, in funzione del dimensionamento del sistema.

Sia le gru nelle versioni base che la prolunga integrale appartengono al gruppo di sollecitazione B3, dipendente dal numero di cicli a fatica considerati nella vita utile della macchina.

Fanno eccezione gli organi stabilizzatori, considerati appartenenti al gruppo B2, poiché sollecitati a un numero di cicli di carico molto inferiori del resto della macchina, poiché, quando la gru lavora lateralmente all'autocarro, vengono sollecitati solo gli organi stabilizzatori posti su quel lato, mentre quelli sul lato opposto risultano scarichi.

Questa classificazione serve a determinare la tensione ammissibile a fatica per i materiali impiegati nei vari elementi che costituiscono la macchina.

I carichi agenti sugli sfili della gru vengono suddivisi dalla stessa normativa in tre macro categorie:

1. *Carichi eccezionali*: sono dovuti ai pesi propri degli elementi della macchina, al carico sollevato, alle azioni inerziali e centrifughe conseguenti al moto delle parti;
2. *Carichi complementari*: sono quelli causati dall'azione del vento;
3. *Carichi eccezionali*: sono, di fatto, i carichi maggiorati impiegati in fase di collaudo.

Carichi eccezionali

In questa tipologia di carico rientrano:

- momenti flettenti verticali, generati dal peso proprio e dal carico sollevato, con le annesse azioni inerziali, poiché i rispettivi punti d'applicazione sono distanti dall'asse colonna;
- momenti flettenti orizzontali, generati dall'inerzia indotta dalla rotazione del tubo colonna;
- forze centrifughe, anch'esse dovute alla rotazione sul piano orizzontale della colonna, ma di entità trascurabile in relazione agli altri carichi agenti;

Per tenere conto dell'effetto aggravante delle inerzie, la norma impone di moltiplicare i vari carichi per dei coefficienti maggiorativi, dipendenti dalla velocità angolare delle rotazioni sui diversi piani, dalla velocità di sollevamento del carico.

Carichi complementari

Nella verifica delle gru _400 e _430 sono state trascurate poiché la macchina è di media taglia e inadatta a funzionare in condizioni di vento forte.

Per il calcolo di tali azioni si fa comunque riferimento alla pressione dinamica che la massima velocità ammessa per il vento (nel caso specifico $40\ \frac{km}{h} = 11.1\ \frac{m}{s}$) esercita sulla superficie convenzionale del carico da sollevare, assunta pari a S = 1.2 m^2/tonn con un minimo di 2 m^2.

L'azione del vento sulla gru risulta minima e comunque vietata in presenza di vento con velocità superiore a $5\ \frac{m}{s} = 18\ \frac{km}{h}$.

Carico di prova

La normativa impone di utilizzare il "grande carico di prova", che considera una maggiorazione del 25% del carico sollevato sommato al 10% del totale del peso proprio delle masse sospese riportate in punta.

Casi di carico

La norma specifica anche i casi di carico e le sollecitazioni ammissibili da applicare alla gru.

- Caso H: è il caso in cui le sollecitazioni sono dovute ai soli carichi principali;
- Caso Hz: è il caso in cui le sollecitazioni sono dovute ai carichi principali e all' azione del vento;
- Caso Hs: è il caso in cui le sollecitazioni sono dovute ai pesi propri della gru e al "grande carico di prova"

Nel caso Hz, le tensioni ammissibili vengono maggiorate del 12,5% rispetto al caso H. Per i modelli _400 e _430, si è verificato che il caso Hz risulta meno gravoso del caso H, in quanto l'aumento delle sollecitazioni dovuto all'effetto del vento risulta inferiore all'aumento del valore ammissibile delle tensioni.
Analogamente, nel caso HS le tensioni ammissibili vengono maggiorate del 10% rispetto al caso Hz ovvero $1.125 \cdot 1.1 = 1.2375$ volte maggiori rispetto al caso H. Valgono dunque le stesse considerazioni fatte per il caso precedente.
Il caso H risulta il più gravoso perciò le verifiche strutturali sono state eseguite in tali condizioni.

Verifica a fatica

La verifica della resistenza a fatica è stata svolta solo per i casi di carico H e per un numero di cicli di sollecitazione al di sopra di $2 \cdot 10^4$, sia per il materiale base che per gli organi di collegamento. Come anticipato, le tensioni ammissibili sono uguali per ogni gruppo di sollecitazione e dipendono sia dalla famiglia di tensioni sia dal numero dei cicli di sollecitazione. Sono stabilite in funzione dei tipi acciai, di sollecitazione, dei casi di intaglio e dei rapporti delle tensioni limite χ.
Il rapporto delle tensioni limite si calcola con le formule:
$\chi = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ oppure $\chi = \tau_{min} / \tau_{max}$ con $\chi \in [-1, 1]$.
Il valore oscilla a seconda del segno delle sollecitazioni limite: nel campo alternato $\chi \in [-1, 0]$.e nel campo pulsante $\chi \in [0, 1]$.
Le tensioni superiori ammissibili nelle diverse condizioni di carico, sia per le sollecitazioni normale e tangenziale negli elementi costruttivi e nei cordoni di

saldatura sono ricavabili in funzione dei valori base delle tensioni ammissibili $\sigma_{D(-1)amm}$ e dal rapporto delle tensioni limite $\chi = -1$.

Le sollecitazioni ammissibili $\sigma_{D(-1)amm}$, , corrispondono alle sollecitazioni tollerabili con 90% di probabilità di assenza di rotture.

Le tensioni superiori ammissibili nel caso di valori di $\chi \neq -1$ sono ricavabili mediante le relazioni riportate nella tabella 18 e nella figura 9 della norma DIN 15018:

- campo alternato ($-1 < \chi < 0$)

trazione: $$\sigma_{Dz}(\chi)_{am} = \frac{5}{3-2\chi} \cdot \sigma_{D(-1)amm}$$

compressione: $$\sigma_{Dd}(\chi)_{amm} = \frac{2}{1-\chi} \cdot \sigma_{D(-1)amm}$$

- campo pulsante ($0 < \chi < +1$)

trazione: $$\sigma_{Dz}(\chi)_{amm} = \frac{\sigma_{Dz(0)amm}}{1-\left(1-\frac{\sigma_{Dz(0)amm}}{0{,}75 \cdot \sigma_B}\right) \cdot \chi}$$

compressione: $$\sigma_{Dd}(\chi)_{amm} = \frac{\sigma_{Dd(0)amm}}{1-\left(1-\frac{\sigma_{Dd(0)amm}}{0{,}90 \cdot \sigma_B}\right) \cdot \chi}$$

dove:

$\sigma_B =$ tensione di rottura

$$\sigma_{Dz(0)amm} = \frac{5}{3} \cdot \sigma_{D(-1)amm}$$

$$\sigma_{Dd(0)amm} = 2 \cdot \sigma_{D(-1)amm}$$

Le sollecitazioni tangenziali ammissibili $\tau_D(\chi)_{am}$ nel materiale base e nei cordoni di saldatura valgono:

- materiale base $\tau_D(\chi)_{amm} = \sigma_{Dz}(\chi)_{amm} / \sqrt{3}$ con $\sigma_{Dz}(\chi)_{amm}$ calcolato per W0

- cordone di saldatura $\tau_D(\chi)_{amm} = \sigma_{Dz}(\chi)_{amm} / \sqrt{2}$ con $\sigma_{Dz}(\chi)_{amm}$ calcolato per K0

In presenza di sollecitazioni composte deve inoltre essere soddisfatta la seguente relazione per la verifica della resistenza a fatica. Occorre tenere conto dei segni e dei rapporti con le corrispondenti sollecitazioni limite per il materiale base o per il cordone di saldatura o per entrambe.

$$\left(\frac{\sigma_X}{\sigma_{XDamm}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_{YDamm}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_X \cdot \sigma_Y}{|\sigma_{XDamm}| \cdot |\sigma_{YDamm}|}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{Damm}}\right)^2 \leq 1.1$$

Dove:

σ_X, σ_Y = tensioni normali di calcolo in direzione x e y;

σ_{XDamm} , σ_{YDamm} = tensioni ammissibili corrispondenti alle tensioni σ_X e σ_Y rispettivamente;

τ = tensione tangenziale di calcolo;

τ_{Damm} = tensione tangenziale ammissibile corrispondente alla tensione τ;

Poiché come già detto, nel caso particolare la "σ_Y" risulta nulla, per la verifica della resistenza a fatica della gru in esame deve , più semplicemente, risultare:

$$(\sigma_{max} / \sigma_{Damm})^2 + (\tau_{max} / \tau_{Damm})^2 \leq 1.1$$

Con la verifica condotta seguendo le norme tedesche DIN la gru risulta verificata in tutti i suoi componenti.

Di seguito si riportano i diagrammi di carico della gru modello _400 verificata seguendo le norme DIN.

400/3
10°
11000kg
*
OPT
2650
12,30
2200
14,45
Kg
m
16500
2,05
8450
4,50
5950
6,30
4550
8,20
3650
10,20
Kg
m
H1-B3
11900 *
3,10
* Max carico passante dall'orizzontale

400/4
10°
8500kg
1900
14,45
1600
16,65
Kg
m
PITS57
1480
15,30
1320
16,65
1180
18,20
1060
19,70
Kg
m
PIQS57
1370
15,50
1200
16,85
1080
18,40
970
19,90
800
21,55
Kg
m
15850
2,05
8050
4,50
5580
6,30
4180
8,20
3270
10,20
2670
12,20
Kg
m
H1-B3
11400*
3,10
* Max carico passante dall'orizzontale
PITS57
3700
7,20
2380
8,55
1660
10,10
1280
11,60
Kg
m
PIQS57
3500
7,35
2200
8,75
1530
10,30
1170
11,80
920
13,45
Kg
m

400/4
H1-B3
3500 7720
2200 4850
1530 3370
1170 2580
920 2030
Kg lbs
2200 4850
1850 4080
1450 3200
1100 2430
900 1980
Kg lbs
80°
45°
PIQS57
7°
1370 3020
1200 2650
1080 2380
970 2140
800 1760
Kg lbs

400/5
10°
7800kg
1400 16,80
1200 19,10
Kg m
1300 17,40
1150 18,95
1000 20,50
850 22,10
Kg m
1230 17,50
1080 19,00
950 20,60
790 22,20
620 23,85
Kg m
15700 2,05
7700 4,65
5300 6,45
3950 8,35
3070 10,30
2480 12,30
2060 14,45
Kg m
H1-B3
11200* 3,10
* Max carico passante dall'orizzontale
3200(a) 7,30
2100 8,80
1500 10,40
1050 12,00
Kg m
(a) Massima inclinazione JIB 45° sotto l' orizzontatale
3050 7,35
1950 8,90
1400 10,45
980 12,10
700 13,75
Kg m

400/5
(a) Massima inclinazione JIB 45° sotto l' orizzontatale
H1-B3
80°
45°
12°
3050(a) 6720
1950 4300
1400 3090
980 2160
700 1540
Kg lbs
1900 4190
1450 3200
1100 2430
880 1940
660 1455
Kg lbs
1230 2710
1080 2380
950 2090
790 1740
620 1370
Kg lbs

400/6
10°
7000kg
1100 19,10
800 21,40
Kg m
950 19,60
800 21,15
670 22,70
560 24,30
Kg m
900 19,70
740 21,20
600 22,75
500 24,40
420 26,05
Kg m
15550 2,05
7600 4,65
5200 6,45
3820 8,35
2930 10,30
2350 12,30
1930 14,45
1640 16,65
Kg m
H1-B3
11050* 3,10
* Max carico passante dall'orizzontale
2350 7,30
1500 8,80
1100 10,40
860 12,00
Kg m
2300 7,35
1450 8,90
1050 10,45
800 12,10
650 13,75
Kg m

400/6
H1-B3
2300 1450 1050 790 650 Kg
5070 3200 2310 1740 1430 lbs
1350 1000 750 600 500 Kg
2980 2200 1650 1320 1100 lbs
900 740 600 500 420 Kg
1980 1630 1320 1100 930 lbs
80°
45°
12°
0 ft.
0 m

400/7
10°
4400kg
6700kg
800 Kg
21,40 m
15400 7300 4950 3630 2770 2200 1790 1500 1280 Kg
2,05 4,75 6,55 8,45 10,45 12,45 14,60 16,80 19,10 m
H1-B3
10850*
3,10
* Max carico passante dall'orizzontale

400/8
10°
4000kg
4200kg
H1-B3
15300 2,05
7200 4,75
4850 6,55
3520 8,45
2660 10,45
2090 12,45
1680 14,60
1400 16,80
1170 19,10
900 21,40
Kg m
10750* 3,10
* Max carico passante dall'orizzontale

Capitolo 4

Classificazione della macchina e dei carichi secondo le norme UNI EN 12999 e UNI EN 13001-2

Classificazione:

- classe di distribuzione della massa: **MDC1** (tutti i carichi agenti per gravità sulle masse sulle differenti parti della gru aumentano gli effetti dei carichi risultanti e non sono affetti da movimenti voluti)
- classe di sollevamento: **HC1** (struttura flessibile e sistema di comando con caratteristiche dinamiche uniformi)
- gruppo di sollecitazione (combinazione dei carichi): **A1** (condizioni di servizio normale, sollevamento/discesa dei carichi con verricello, senza effetti del vento[1]).
- tipo di comando di sollevamento: **HD4** (comando continuo del dispositivo di sollevamento che opera a velocità continuamente crescente).

Ipotesi di carico:

I carichi sono suddivisi in:

- **regolari**: comprendono gli effetti del sollevamento e della gravità agenti sulla massa della gru, gli effetti dell'inerzia e della gravità agenti verticalmente sul carico sollevato, i carichi causati dal movimento su una superficie irregolare, i carichi causati dalla accelerazione di tutti i comandi della gru ed i carichi indotti dal movimento;

[1] L'azione del vento si considera agente solo sul carico, poiché la struttura della gru ne risente in maniera trascurabile, senza considerare che nelle sezioni di maggiore ingombro vi è l'effetto della cabina di guida dell'automezzo che smorza l'effetto.

- **complementari:** comprendono i carichi dovuti al vento in condizioni di servizio, i carichi dovuti a neve e ghiaccio, i carichi dovuti alla variazione di temperatura ed i carichi causati dal movimento di traverso;
- **eccezionali:** comprendono i carichi causati dal sollevamento di un carico da terra in circostanze eccezionali, i carichi dovuti al vento in condizioni fuori servizio, i carichi di collaudo,i carichi dovuti alle forze dei respingenti, i carichi dovuti alle forze di ribaltamento, i carichi causati dall'azionamento dell'emergenza, i carichi causati dal cedimento di un meccanismo o di elementi, i carichi dovuti ad eccitazione esterna dalla fondazione della gru ed i carichi causati dal montaggio e dallo smontaggio.

Carichi regolari

Effetti del sollevamento e della gravità agenti sulla massa della gru

Le masse della gru devono essere moltiplicate per il coefficiente ϕ_1, definito come segue:

$\phi_1 = 1 + \delta$ con $0 \leq \delta \leq 0.1$

Scelgo $\delta = 0.1$ da cui $\phi_1 = 1.1$.

Le masse interessate sono quelle degli elementi sempre presenti durante le operazioni ad eccezione del carico netto stesso.

Sollevamento da terra di un carico libero

Il carico sollevato deve essere moltiplicato per il coefficiente ϕ_2 , definito nel seguente modo:

$\phi_2 = \phi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_h$

Da normativa:

$\phi_{2,min} = 1.05$ e $\beta_2 = 0.17$.

$v_h = 0.5 \cdot v_{h,max}$

v_h è la velocità caratteristica di sollevamento [m/s]

$v_{h,max}$ è la massima velocità costante di sollevamento ed è stata determinata sperimentalmente, noti la portata massima del pistone principale ed il tempo occorrente per una sfilata completa.

La portata massima di olio del pistone principale è 60 l/min.

Noti alesaggio e corsa, rispettivamente pari a 220mm e 840mm, si è calcolato il volume d'olio necessario ad una sfilata completa:

$V = \pi \frac{d^2}{4} \cdot c = \pi \frac{22^2}{4} 840 = 31.9\ dm^3$

Il tempo occorrente ad eseguire una sfilata completa è

$t = V \cdot \frac{Q}{60} = 31.9 \cdot \frac{60}{60} = 31.9\ s$

In una sfilata completa il braccio principale compie una rotazione sul piano verticale da ~47° sotto l'orizzontale a ~81° sopra, per un totale di α=128° spazzati, pari a 2.23 rad.

La velocità angolare di sollevamento risulta quindi:

$\omega_{teorica_400} = \frac{2.23}{31.9} \cong 0.07\ rad/s$

Si è misurato sperimentalmente che per andare dall'orizzontale a ~77° (1.34 rad) sopra, col carico applicato, occorrono 21.5 s, da cui:

$\omega_{reale_400} = \frac{1.34}{21.5} \cong 0.062\ rad/s$

La riduzione di velocità rispetto al caso teorico è dovuta alla presenza di valvole, al calo di rendimento volumetrico della pompa e alla diminuzione del numero di giri del motore.

Nell'impianto idraulico è inserita una valvola che mette a scarico una portata di olio al crescere della pressione nei pistoni principale, secondario o articolazione della prolunga integrale.

Nella _430 quando la pressione raggiunge l'80% della massima, viene messa a scarico il 75% della portata. In questa condizione il tempo di sollevamento diventa quattro volte superiore.

Nella _400 lo scarico di olio è molto inferiore e risulta trascurabile.

Rispetto alla _400, la _430 è caratterizzata da portate e pressioni indotte superiori.

Come tempo di sollevamento si considera dunque 21.5s per la _400 e 86s per la _430.

La gru viene chiamata _400 con velocità di sollevamento normale e _430 con velocità di sollevamento ridotta.

La massa del carico sollevato comprende le masse del carico utile, i dispositivi di sollevamento e una porzione delle funi e delle catene di sollevamento sospese, ecc.

Per come è stata ottenuta, la ω_{reale} corrisponde alla ω_{max_400}.

Si è assunto un comando di sollevamento HD4, considerando un incremento lineare della ω a partire da un valore minimo nullo fino ad un certo valore massimo. Si suppone di azionare il comando di alzata molto rapidamente, raggiungendo così in pochi istanti la massima velocità di sollevamento, ottenendo che la velocità ω misurata corrisponde a quella massima.

Come velocità di sollevamento massima considero dunque

$v_{h,max_400} = \omega_{max_400} * b_{i,max}$

$v_{h,max_430} = \omega_{max_430} * b_{i,max}$

con b_i = braccio i-esimo del carico rispetto all'asse di rotazione della colonna.

Trattandosi di una verifica da eseguire su una macchina già in produzione e quindi nota in tutte le sue caratteristiche sia a livello progettuale che in condizioni reali di lavoro, che si ha già un'ampia conoscenza sull'entità delle sollecitazioni agenti sulle strutture. Poiché le sollecitazioni maggiori si hanno nella gru_400, risulta superfluo verificare la _430.

I risultati sono riportati nella tabella seguente:

Allestimento _400/_430	$b_{i,max}$ [m]	v_{h,max_400} [m/s]	v_{h_400} [m/s]
.3	10.20	0.632	0.316
.3 +PM1sf	12.30	0.763	0.382
.3 +PM2sf	14.45	0.896	0.448
.4	12.20	0.756	0.383
.4+PM1sf	14.45	0.896	0.448
.4+PM2sf	16.65	1.032	0.516
.4 J3	19.70	1.221	0.611

Allestimento _400/_430	$b_{i,max}$ [m]	v_{h,max_400} [m/s]	v_{h_400} [m/s]
.6	16.65	1.032	0.516
.6 +PM1sf	19.10	1.184	0.592
.6 +PM2sf	21.40	1.326	0.663
.6 J3	23.40	1.451	0.723
.6 J3 +PM1sf	25.95	1.609	0.805
.6 J3 +PM2sf	27.60	1.711	0.856
.6 J4	**26.05**	**1.615**	**0.808**

.4 J4	21.55	1.336	0.668
.5	14.45	0.896	0.448
.5 + PM1sf	16.80	1.042	0.521
.5 + PM2sf	19.10	1.184	0.592
.5 J3	22.10	1.370	0.737
.5 J3 +PM1sf	23.75	1.473	0.737
.5 J3 +PM2sf	25.40	1.575	0.788
.5 J4	23.85	1.479	0.740
.5 J4 +PM1sf	25.55	1.584	0.792

.6 J4 +PM1sf	27.65	1.714	0.357
.7	19.10	1.184	0.592
.7 +PM1sf	21.40	1.327	0.664
.8	**21.40**	**1.327**	**0.664**

J3, J4 = prolunghe integrali ad azionamento oleodinamico a 3 e 4 sfili rispettivamente

PM1sf , PM2sf = prolunghe meccaniche ad azionamento manuale ad 1 o 2 sfili rispettivamente

Nei vari allestimenti della gru cambia solo il numero degli sfili, con i relativi organi di controllo, ma le sezioni di questi sono invarianti.

Assumendo la condizione più critica verificabile, considero:

- v_{h_400} = 0.808 m/s fino al sesto sfilo, comprese le prolunghe integrali e quelle meccaniche;
- v_{h_400} = 0.664 m/s per il settimo ed ottavo sfilo.

Ne discende:

$\phi_2 = 1.05 + 0.17 \cdot 0.808 \cong \mathbf{1.18}$ fino alla _400.6 + J4

$\phi_2 = 1.05 + 0.17 \cdot 0.664 \cong \mathbf{1.16}$ per le _400.7 e _400.8 (→ 7° ed 8° sfilo)

Sono state assegnate portate differenziate a seconda che si utilizzi o meno il verricello (per tener conto anche dei tiri della fune che vanno a gravare sulle strutture di sfili della gru e degli steli dei pistoni di sfilamento). Inizialmente sono state calcolate le sollecitazioni nella gru_400 senza verricello.

Le portate sono tali che la _430 senza verricello e le _400 e _430 con verricello diano sollecitazioni in tutta la gru non superiori a quelle della _400 con gancio. Verificata la gru_400, la verifica della _430 risulta superflua.

Rilascio improvviso di una parte del carico sollevato: non previsto

Carichi causati dallo spostamento su superfici irregolari: non previsto

Carichi causati dall'accelerazione dei comandi

Gli effetti inerziali agenti verticalmente sul carico sollevato sono già stati considerati nel precedente paragrafo, pertanto si vanno a considerare solamente quelli agenti sul piano orizzontale.

Si considera il carico lordo[2] applicato immediatamente sotto al gancio: questa è la situazione più gravosa poiché non si considerano eventuali smorzamenti delle azioni inerziali prodotte dai sistemi di aggancio del carico (es. funi, catene, ecc).

Si distinguono le accelerazioni in direzione verticale e quelle in orizzontale.

L'effetto del carico S viene applicato agli elementi esposti alle forze dei comandi, alla gru ed al carico lordo.

Sul piano orizzontale si hanno solo gli effetti prodotti dalla rotazione della colonna principale.

La norma UNI EN 12999 impone:

$$\overline{S} = S_i + \phi_5 \cdot \Delta S$$

dove:

- $\Delta S = S_f - S_i$ è la variazione dell'effetto del carico dovuto alla variazione della forza del comando $\Delta F = F_f - F_i$
- S_f, S_i sono gli effetti del carico iniziale (i) e finale (f)
- F_i, F_f sono le forze del comando iniziali (i) e finale (f)

Come prescritto dalla norma UNI EN 12999 assumo $\boldsymbol{\phi_5 = 1.05}$.

Per eseguire la verifica ci si pone nella situazione più gravosa: si ipotizza, dunque, una condizione di gru ferma ed una successiva messa in rotazione della colonna principale: in questo modo l'accelerazione angolare agente sulla macchina risulta essere la massima.

[2] Per carico lordo si intende la somma delle masse di carico utile, accessori di presa e, qualora applicabile, una parte della fune

Per la verifica delle versioni delle macchine con in dotazione la prolunga integrale (PI) va naturalmente considerata anche la massa di tali estensioni. Le PI sono presenti in due versioni, #57 e #60, ciascuna dotata di tre (PITS) o quattro sfili (PIQS). A favore di sicurezza, si considera sempre il caso più gravoso, che si presenta con le versioni a quattro bracci sfilabili (le sollecitazioni risultano essere maggiori con la PIQS). Le macchine vengono allestite come segue:

- _400.4 allestita con PIQS 57
- _400.5 allestita con PIQS 60
- _400.6 allestita con PIQS 60

Per la determinazione della massa totale si considerano le masse parziali indicate nella tabella che segue, ad esclusione del gruppo basamento, della colonna e del pistone principale, poiché questi non incidono significativamente sull'inerzia. Per determinare i baricentri, invece, si estrapolano i dati dal modello CAD 3D. Le masse riportate in tabella sono misurate e pertanto più attendibili[3].

Pesi propri [daN]		PESI PROPRI PI57		PESI PROPRI PI60	
Basamento completo di traverse, pistoni, piedi di appoggio, cremagliera, distributore, tubi, valvole	1650	Nasello	75	Nasello	50
Colonna rotante	460	Bielle	30	Bielle	30
Braccio principale	312	Braccio	125	Braccio	100
Braccio secondario	370	1° sfilo	70	1° sfilo	53
1° braccio sfilabile	175	2° sfilo	60	2° sfilo	43

[3] Per i pistoni, ad esempio, il cad non considera l'olio in esso contenuti, la cui massa incide però in maniera significativa. Al contrario, la posizione del baricentro si ritiene che vari di una quantità trascurabile, nell'ordine di qualche centimetro, pertanto si ritengono validi i dati forniti dal calcolatore

2° braccio sfilabile	142	3° sfilo	55	3° sfilo	41
3° braccio sfilabile	134	4° sfilo	50	4° sfilo	32
4° braccio sfilabile	133	Pistone articolazione	85	Pistone articolazione	50
5° braccio sfilabile	127	Pistone 1° sfilo	37	Pistone 1° sfilo	24
6° braccio sfilabile	103	Pistone 2° sfilo	40	Pistone 2° sfilo	24
7° braccio sfilabile	86	Pistone 3° sfilo	40	Pistone 3° sfilo	23
8° braccio sfilabile	74	Pistone 4° sfilo	38	Pistone 4° sfilo	25
Pistone principale	210				
Pistone secondario	210				
Pistone 1° sfilo	50				
Pistone 2° sfilo	52				
Pistone 3° sfilo	53				
Pistone 4° sfilo	49				
Pistone 5° sfilo	51				
Pistone 6° sfilo	52				
Pistone 7° sfilo	52				
Pistone 8° sfilo	52				

Considero la massa concentrata nel baricentro e come braccio la distanza di questo dall'asse colonna, mentre per i carichi assumo quelli massimi previsti per ciascuna configurazione.

configurazione	Σ_i p_i [kg]	a_i [m]	Q [kg]	L_i [m]
_400.4	1680	4.28	2670	12.20
_400.4+J4	2385	7.97	800	21.55
_400.5	1858	5.07	2060	14.45
_400.5+J4	2353	7.73	620	23.85
_400.6	2013	5.91	1640	16.65
_400.6+J4	**2508**	**8.62**	**420**	**26.05**

_400.8	**2277**	**7.44**	**900**	**21.40**

Dove:

- $\Sigma_i\ p_i$ = somma dei pesi propri dei soli bracci ed accessori
- a_i = distanza del baricentro dei pesi propri dei soli bracci ed accessori dall'asse colonna
- Q = carico sollevato

La norma UNI EN 12999 impone di considerare come forze dovute all'accelerazione del gruppo dei comandi i carichi orizzontali dovuti alla massa della gru e al carico utile, calcolate mediante la relazione:

$$F_{hi} = m_i \cdot g \cdot tg\ \alpha$$

Dove:

- F_{hi} è il carico orizzontale indotto dalla massa della gru e dal carico utile
- m_i è la somma della massa della gru e del carico utile
- g è la costante di gravità (9.81 m/s^2)
- α è la massima inclinazione ammessa per la gru, in questo caso $\alpha = 5°$.

Come per i carichi verticali, viene calcolata la F_{hi} in funzione della sezione che si sta verificando.

Ancora una volta, la configurazione più sfavorevole è data dalla gru con bracci primario e secondario orizzontali e con tutti gli sfili aperti, compresi quelli delle prolunghe integrali, sempre poste in orizzontale.

Vale ancora la considerazione di macchina inizialmente ferma, per cui anche in questo caso si ha S_i=0.

Ne consegue che $\Delta S = S_f = F_{hi}$.

Si ricavano le spinte $\overline{S} = \phi_5 \cdot \Delta S$, con $\phi_5 = 1.05$.

<u>Carichi indotti dagli spostamenti</u>: quando la gru è in opera, i dispositivi di sicurezza e stabilizzazione impongono che il veicolo sia fermo.

Tali carichi pertanto non sono previsti.

Carichi dovuti al vento in condizioni di servizio:

I carichi da vento, sono assunti come agenti perpendicolarmente all'asse longitudinale del componente della gru, sono calcolati da:

- $F = q(3) \cdot c \cdot A$ relativi alla struttura della gru;
- $F = \varepsilon_s \cdot q(3) \cdot c \cdot A$ relativi alle forze del comando richieste per l'avvio;
- $F = \varepsilon_M \cdot q(3) \cdot c \cdot A$ relativi alle forze del comando durante il movimento controllato;

dove:

- F è il carico da vento agente perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'elemento considerato;
- c è il coefficiente aerodinamico dell'elemento considerato; questo deve essere usato in combinazione con l'area caratteristica A; (i valori di c sono forniti dalla norma stessa);
- A è l'area caratteristica dell'elemento considerato;
- $q(3) = 0,5 \cdot \rho \cdot v(3)^2$ è la pressione del vento a $v(3)$;
- $\rho = 1,25\ kg/m^3$ è la densità dell'aria;
- $\varepsilon_S = 0,7$ è il coefficiente della forza di avvio convenzionale;
- $\varepsilon M = 0,37$ è il coefficiente della forza media convenzionale del comando;
- $v(3) = 1,5 \cdot v$ è la velocità della raffica di vento media in un periodo di 3 s;
- $\underline{v}$ è la velocità del vento media in 10 min a 10 m di altezza sul terreno piatto o al livello del mare, in relazione alla scala di Beaufort.

Per il calcolo dei carichi dovuti al vento in condizioni di servizio, si assume che il vento soffi orizzontalmente ad una velocità costante media a tutte le altezze.

Nella verifica delle gru _400 e _430 i carichi causati dall'azione del vento sono stati trascurati, poiché la macchina è di media taglia e inadatta a funzionare in condizioni di vento forte.

Carichi eccezionali

<u>Carichi di prova</u>: sono applicati alla gru in condizioni di servizio.

La norma prescrive che tale carico di prova sia moltiplicato per un coefficiente ϕ_6 calcolato come segue:

- <u>carico di prova dinamico</u>: il carico di prova deve essere almeno il 110% del massimo carico sollevato;

$\phi_6 = 0.5\ (1.1 + \phi_2)$

- <u>carico di prova statico</u>:

il carico durante la prova deve essere almeno il 125% del massimo sollevato;

$\phi_6 = 1.$

Combinazioni di carico

La normativa impone che per la verifica e la resistenza a fatica si devono considerare le combinazioni di carico A, con tutti i coefficienti di sicurezza parziale γ_p posti uguali a 1.00*.

<table>
<tr><th rowspan="2">Categorie dei carichi</th><th colspan="3" rowspan="2">Carichi f_i</th><th rowspan="2">i</th><th colspan="5">Combinazioni di carico A</th></tr>
<tr><th>Coeff. di sicurezza parziale γ_p</th><th>A1</th><th>A2</th><th>A3</th><th>A4</th></tr>
<tr><td rowspan="6">regolare</td><td rowspan="3">Accelerazione di gravità, impatti</td><td colspan="2">Masse della gru</td><td>1</td><td rowspan="6">1.00*</td><td>$\boldsymbol{\phi_1}$</td><td>ϕ_1</td><td>1</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Massa del carico sollevato</td><td>2</td><td>$\boldsymbol{\phi_2}$</td><td>ϕ_3</td><td>1</td><td>-</td></tr>
<tr><td>3</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>ϕ_4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Accelerazione dai comandi</td><td rowspan="2">Masse della gru e del carico sollevato</td><td>Esclusi i comandi di sollevamento</td><td>4</td><td>$\boldsymbol{\phi_5}$</td><td>ϕ_5</td><td>-</td><td>ϕ_5</td></tr>
<tr><td>Inclusi i comandi di sollevamento</td><td>5</td><td>-</td><td>-</td><td>ϕ_5</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="3">Movimenti</td><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr>
<tr><td>occasionale</td><td colspan="9">non previsti</td></tr>
<tr><td>eccezionale</td><td colspan="3">forze dovute ad un effetto eccezionale</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

Secondo la norma UNI EN 13001-2, la combinazione di carico da utilizzare è la A1: la combinazione di carico A copre i carichi regolari per una gru durante l'operazione normale; la A1 in particolare fa riferimento al sollevamento e deposito di carichi.

Capitolo 5
Verifiche strutturali

Le sollecitazioni agenti sui componenti della macchina sono determinate secondo il concetto di sollecitazione nominale, ovvero una sollecitazione agente sul materiale base adiacente ad una posizione di cricca potenziale, calcolata secondo la teoria della resistenza elastica semplice. Queste includono gli effetti di concentrazione della sollecitazione locale, dovuti alle influenze dei dettagli di costruzione, principalmente causati da:

- concentrazioni di sollecitazioni locali dovute alla forma del giunto e alla geometria della saldatura;
- dimensioni e forma delle discontinuità accettabili;
- sollecitazioni residue;
- in alcuni casi, il processo di saldatura e le procedure di miglioramento post-saldatura.

Per l'esecuzione della verifica di resistenza a fatica è necessaria la storia dei coefficienti di sollecitazione, determinabili usando le classi "S". Così facendo si tiene conto delle condizioni di servizio e del loro effetto sulla sollecitazione della struttura.
L'influenza della sollecitazione media nelle strutture in condizioni "come saldate" (ovvero senza rinvenimento della sollecitazione) è trascurabile.
Il coefficiente della storia delle sollecitazioni "s" è quindi indipendente dalla sollecitazione media e la resistenza a fatica secondo normativa si basa prettamente sull'intervallo delle sollecitazioni.

Nei dettagli non-saldati oppure in quelli saldati e rinvenuti, l'intervallo effettivo di sollecitazione da utilizzare nella valutazione della fatica può essere determinato aggiungendo la porzione di trazione dell'intervallo di sollecitazioni e il 60% della porzione di compressione dell'intervallo di sollecitazione o tramite un'analisi speciale.
Le incertezze nel valutare la resistenza a fatica e le possibili conseguenze di un danneggiamento devono essere tenute in considerazione tramite un coefficiente di resistenza specifica alla fatica γ_{Mf} .

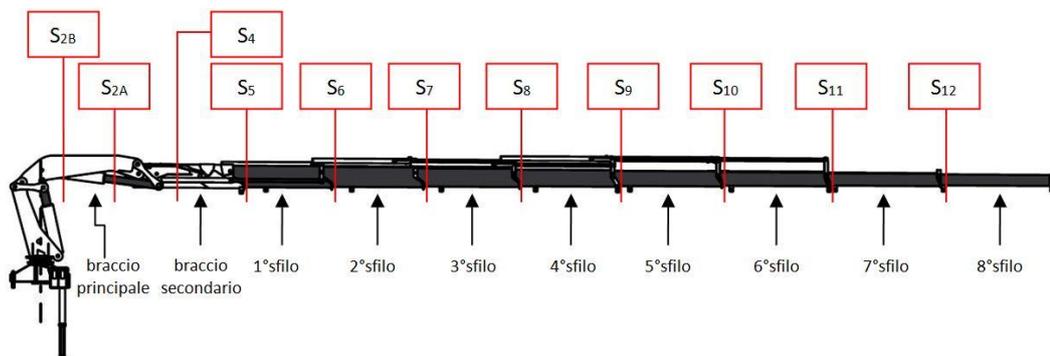
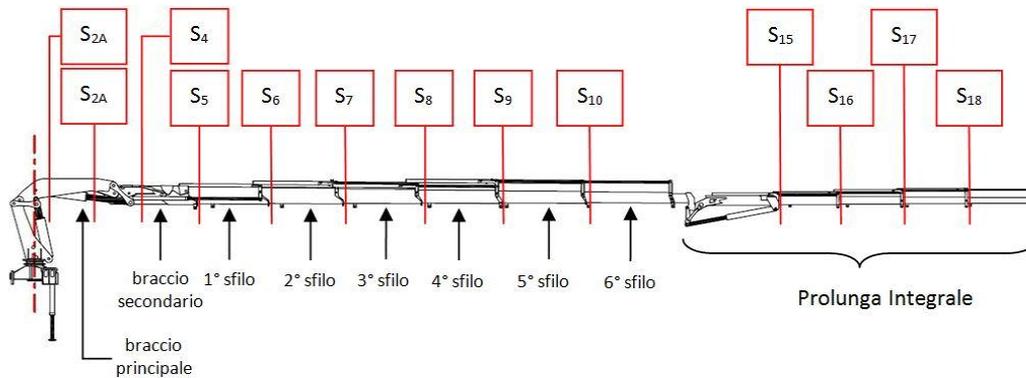
γ_{Mf}			
Ispezione ed accesso	Componenti sicuri	Componenti non sicuri	
		Senza pericolo per le persone	Con pericolo per le persone
Ispezione e manutenzione periodica. Dettagli del giunto	1.0	**1.15**	1.25

accessibili			
Ispezione e manutenzione periodica. Scarsa accessibilità	1.15	1.25	1.35

Si definiscono:

- Componenti strutturali "sicuri" sono quelli con ridotte conseguenze del cedimento, così che il cedimento locale di un elemento non causa il cedimento della struttura o la caduta dei carichi.
- Componenti strutturali non "sicuri" sono quelli nei quali il cedimento locale di un elemento porta rapidamente al cedimento della struttura o alla caduta dei carichi.

<u>Esecuzione della verifica a fatica</u>

- Gru base _400.8

- Gru _400.6 + J4

Sezione calcolata	
S0	Asse colonna
S1	Articolazione colonna - braccio principale
S2	Braccio principale
S3	Articolazione braccio principale
S4	Braccio secondario
S5	**1° braccio sfilabile**
S6	**2° braccio sfilabile**
S7	**3° braccio sfilabile**
S8	**4° braccio sfilabile**
S9	**5° braccio sfilabile**
S10	**6° braccio sfilabile**
S11	**7° braccio sfilabile**
S12	**8° braccio sfilabile**
S13	Articolazione PI60
S14	Braccio PI60
S15	1° sfilo PI60
S16	2° sfilo PI60
S17	3° sfilo PI60

S18	4° sfilo PI60
S19	Articolazione PI57
S20	Braccio PI57
S21	1° sfilo PI57
S22	2° sfilo PI57
S23	3° sfilo PI57
S24	4° sfilo PI57
S25	Prolunga meccanica PE2A
S26	Prolunga meccanica PE3A
S27	Prolunga meccanica PE2B

La prima verifica si esegue sulla gru _400.8

Per il dettaglio in analisi si deve verificare che:

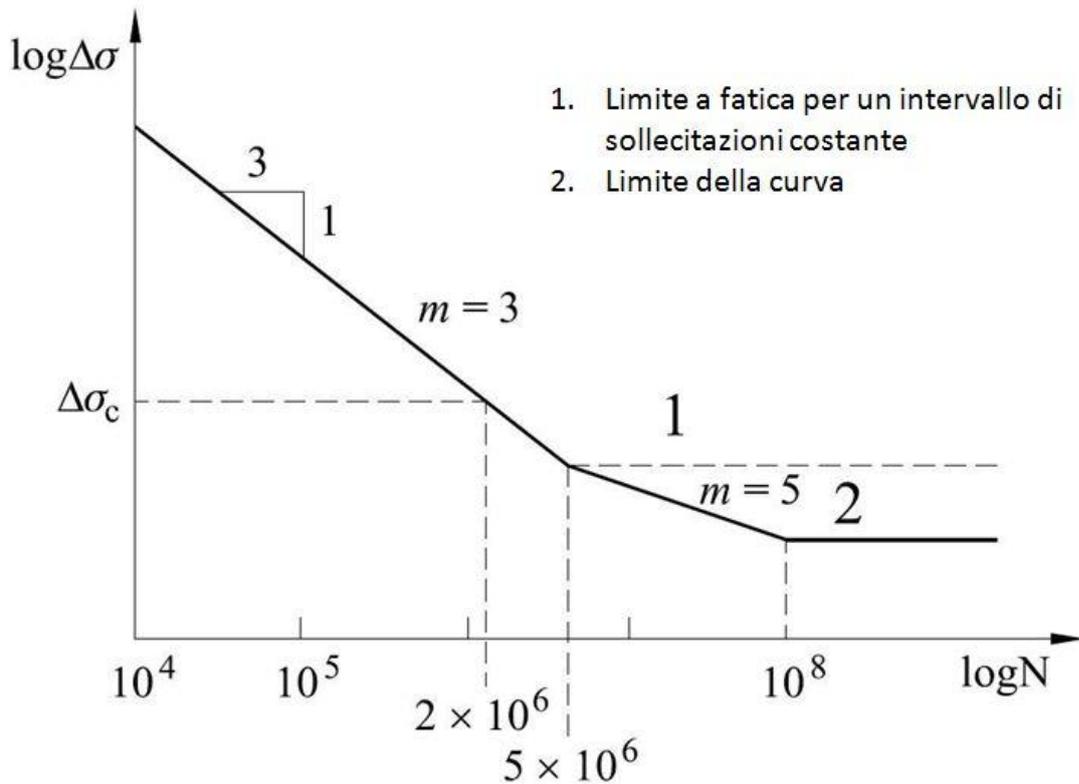
$\Delta\sigma_{Sd} \leq \Delta\sigma_{Rd}$

con

$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

dove:

- $\Delta\sigma_{Sd}$ è il maggiore intervallo calcolato delle sollecitazioni di progetto;
- σ_{max}, σ_{min} sono i valori estremi delle sollecitazioni di progetto risultanti dalle combinazioni di carico A, secondo la EN 13001-2, applicando $\gamma_P = 1$ (sollecitazione di compressione con segno negativo).
- $\Delta\sigma_{Sd}$ è l'intervallo di sollecitazione ammissibile.

Definizione dei parametri di resistenza ed esecuzione della verifica

Il diagramma sopra riportato mostra i valori caratteristici dell'intervallo di sollecitazione.

$\Delta\sigma_c$ indica la resistenza a fatica sotto un intervallo di $2 \cdot 10^6$ cicli a sollecitazione costante e con una probabilità di sopravvivenza di $P_s = 97.7\%$.

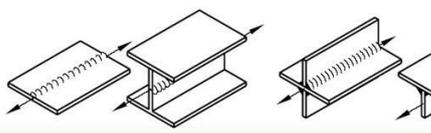
Si considera una vita media utile della gru di $2 \cdot 10^5$ cicli e si assume di conseguenza un fattore "m" (pendenza inversa della curvaσ/N) pari a 3.

Il valore dell'intervallo di sollecitazione $\Delta\sigma_c$ (e analogamente $\Delta\tau_c$) è funzione del livello di qualità della saldatura e del tipo di sollecitazione agente su questa.

Si fa riferimento ad una classe di qualità del giunto di livello B.

Dalla norma UNI/CEN TS 13001-3-1 si sceglie il giunto No. 7 "sollecitazione normale nella direzione della saldatura", con saldatura a piena penetrazione, continua ed una qualità di livello nelle condizioni di base, che fornisce $\Delta\sigma_c$ e $\Delta\tau_c$ pari a 180 N/mm^2 .

prospetto A.3 **Elementi saldati** (Continua)

No.	$\Delta\sigma_c$ $\Delta\tau_c$ (N/mm²)	Dettaglio costruttivo	Requisiti
7	m = 3	**Sollecitazione normale nella direzione della saldatura**	Condizioni di base: - Saldatura manuale o parzialmente meccanizzata Condizioni speciali: - Saldatura automatica, nessun punto inziale +1 NC - Saldatura con restringimento da contrazione -1 NC
	180	Saldatura a piena penetrazione, continua, qualità di livello B	
	160	Saldatura a piena penetrazione, continua, qualità di livello C	
	140	Saldatura a penetrazione parziale, continua, qualità di livello C	
	90	Saldatura intermittente, qualità di livello C	

Si sceglie un coefficiente di resistenza specifica alla fatica γ_{Mf} = 1.15, considerando i componenti non sicuri – senza pericolo per le persone, eseguendo un'ispezione e manutenzione periodica degli elementi, con dettagli del giunto accessibili.

Per trovare s(m), ovvero il coefficiente della storia delle sollecitazioni è necessario conoscere la classe S dei coefficienti di storia delle sollecitazioni.

La classe S va scelta a sua volta in funzione della classe dello spettro di carico Q_n, del tipo di struttura, della classe del numero totale dei cicli di lavoro U e del prodotto $\frac{G_t}{\phi_2 \cdot Q}$.

Dalla norma UNI EN 13001-1 si assume una classe dei numeri totali dei cicli di lavoro $\mathbf{U_4}$, avendo preso un numero totale di cicli di lavoro **C** compreso nell'intervallo]1.25-2.50]·10^5.

Classi *U* dei numeri totali dei cicli di lavoro *C*

Classe	Numero totale dei cicli di lavoro
U_0	$C \leq 1{,}60 \times 10^4$
U_1	$1{,}60 \times 10^4 < C \leq 3{,}15 \times 10^4$
U_2	$3{,}15 \times 10^4 < C \leq 6{,}30 \times 10^4$
U_3	$6{,}30 \times 10^4 < C \leq 1{,}25 \times 10^5$
U_4	$1{,}25 \times 10^5 < C \leq 2{,}50 \times 10^5$
U_5	$2{,}50 \times 10^5 < C \leq 5{,}00 \times 10^5$
U_6	$5{,}00 \times 10^5 < C \leq 1{,}00 \times 10^6$
U_7	$1{,}00 \times 10^6 < C \leq 2{,}00 \times 10^6$
U_8	$2{,}00 \times 10^6 < C \leq 4{,}00 \times 10^6$
U_9	$4{,}00 \times 10^6 < C \leq 8{,}00 \times 10^6$

Un ciclo di lavoro è una sequenza di movimenti che ha inizio quando la gru è pronta a sollevare il carico utile e finisce quando la gru è pronta a sollevare il prossimo carico utile durante lo stesso compito.

Un compito "**r**" può essere caratterizzato da una combinazione specifica della configurazione della gru e della sequenza di movimenti utili.

Come caso "r" si considera il caso di massimo carico, per dato allestimento, agente sulla gru per il 10% della sua vita utile, ovvero pari a $2 \cdot 10^4$ cicli.

Risultano quindi definiti il numero totale di cicli di lavoro durante la vita utile ($C=2 \cdot 10^5$) ed il numero di cicli di lavoro del compito r ($\mathbf{C_r}=2 \cdot 10^4$).

Come classe degli spostamenti lineare ed angolare medi assumo rispettivamente D_{lin4} e D_{ang3} corrispondenti a spostamenti medi $5m < \underline{\mathbf{X}}_{\mathbf{lin}} \leq 10m$ il primo e $\pi/4 < \underline{\mathbf{X}}_{\mathbf{ang}} \leq \pi/2$ il secondo.

Classi *D* dello spostamento medio $\bar{X}$

Spostamento lineare		Spostamento angolare	
Classe	Spostamento medio $\bar{X}_{lin}$ [m]	Classe	Spostamento medio $\bar{X}_{ang}$ [rad]
$D_{lin\,0}$	$\bar{X}_{lin} \leq 0{,}63$	$D_{ang\,0}$	$\bar{X}_{ang} \leq \pi/16$
$D_{lin\,1}$	$0{,}63 < \bar{X}_{lin} \leq 1{,}25$	$D_{ang\,1}$	$\pi/16 < \bar{X}_{ang} \leq \pi/8$
$D_{lin\,2}$	$1{,}25 < \bar{X}_{lin} \leq 2{,}5$	$D_{ang\,2}$	$\pi/8 < \bar{X}_{ang} \leq \pi/4$
$D_{lin\,3}$	$2{,}5 < \bar{X}_{lin} \leq 5$	$D_{ang\,3}$	$\pi/4 < \bar{X}_{ang} \leq \pi/2$
$D_{lin\,4}$	$5 < \bar{X}_{lin} \leq 10$	$D_{ang\,4}$	$\pi/2 < \bar{X}_{ang} \leq \pi$
$D_{lin\,5}$	$10 < \bar{X}_{lin} \leq 20$	$D_{ang\,5}$	$\pi < \bar{X}_{ang} \leq 2\pi$
$D_{lin\,6}$	$20 < \bar{X}_{lin} \leq 40$		
$D_{lin\,7}$	$40 < \bar{X}_{lin} \leq 80$		
$D_{lin\,8}$	$80 < \bar{X}_{lin} \leq 160$		
$D_{lin\,9}$	$160 < \bar{X}_{lin} \leq 320$		

Si assume un coefficiente dello spettro di carico **kQ** pari a 0.5 al quale corrisponde, secondo norma UNI EN 13001-1, una classe Q_4.

Classi *Q* dei coefficienti dello spettro di carico *kQ*

Classi	Coefficienti dello spettro di carico
Q_0	$kQ \leq 0{,}0313$
Q_1	$0{,}0313 < kQ \leq 0{,}0625$
Q_2	$0{,}0625 < kQ \leq 0{,}1250$
Q_3	$0{,}1250 < kQ \leq 0{,}2500$
Q_4	$0{,}2500 < kQ \leq 0{,}5000$
Q_5	$0{,}5000 < kQ \leq 1{,}0000$

Occorre ora definire il fattore $\dfrac{G_t}{\phi_2 \cdot Q}$.

G_t è la massa delle parti rotanti, ovvero ai pesi propri della macchina.

Si sta considerando la configurazione _400.6+J4 alla quale corrisponde una massa complessiva della sola macchina pari a $\Sigma_i\, p_i$ = 2508 kg ≅ 2508 daN = $\mathbf{G_t}$.

Il coefficiente dinamico è già stato definito precedentemente: per la configurazione in esame risulta essere $ø_2$= 118.

Q è il massimo carico sollevato che influenza la parte in analisi: per data configurazione, Q è pari a 420 daN.

Ne consegue $\frac{G_t}{\phi_2 \cdot Q} = 1.67$.

Si assume inoltre una struttura con travi principali sporgenti oltre i supporti.

Secondo la norma UNI CEN/TS 13001-1 la classe S che ne risulta è S_3.

Classi *S* dei coefficienti *s* della storia della sollecitazione

Classe	Coefficiente della storia della sollecitazione
S_0	$s \leq 0{,}008$
S_1	$0{,}008 < s \leq 0{,}016$
S_2	$0{,}016 < s \leq 0{,}032$
S_3	$0{,}032 < s \leq 0{,}063$
S_4	$0{,}063 < s \leq 0{,}125$
S_5	$0{,}125 < s \leq 0{,}250$
S_6	$0{,}250 < s \leq 0{,}500$
S_7	$0{,}500 < s \leq 1{,}000$
S_8	$0{,}1000 < s \leq 2{,}000$
S_9	$0{,}2000 < s \leq 4{,}000$

Dalla UNI CEN/TS 13001-3-1 risulta definito il coefficiente s(m=3) della storia delle sollecitazioni: s = 0.063.

s* (*m* = 3) delle classi *S

Classe	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
s (*m* = 3)	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0

I parametri trovati vengono riassunti nella tabella seguente:

$\Delta\sigma_c$, $\Delta\tau_c$ =180 N/mm^2
γ_{Mf} = 1.15
$1.25 \cdot 10^5 < C \leq 2.50 \cdot 10^5$, $C_r = 2 \cdot 10^4$

U_4
D_{lin4} (5m < $\underline{X}_{lin} \leq$ 10m) - D_{ang3}(π/4 < $\underline{X}_{ang} \leq \pi$/2)
Q_4
G_t =2508 daN ≅ 2508 kg = $\Sigma_i\ p_i$
$ø_1$ = 1.1
1.18 fino alla 400.6 + J4 1.16 per il 7° ed 8° sfilo
Q = 4200 N
$\frac{G_t}{\phi_2 \cdot Q}$ = 1.67
s(m=3) = 0.063

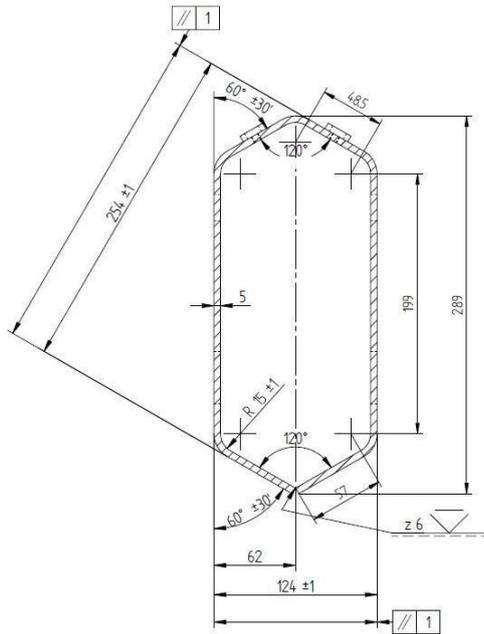
Si può ora definire l'intervallo di sollecitazione ammissibile $\Delta\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{Rd}}$.

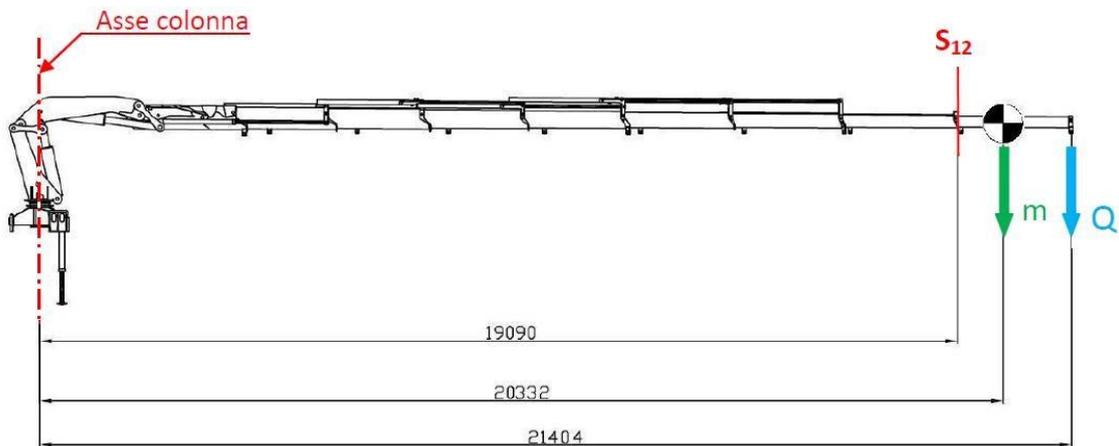
$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf} \cdot \sqrt[m]{s(m=3)}} = \frac{180}{1.15 \cdot \sqrt[3]{0.063}} = 393.3 \frac{N}{mm^2}$$

Per definire $\Delta\sigma_{Sd}$ occorre conoscere le sollecitazioni massime e minime (σ_{max} - σ_{min}).

σ_{max} è la sollecitazione massima che, nel caso specifico, è generata dall'azione del peso proprio e del carico utile, mentre σ_{min} è la sollecitazione minima che nel caso specifico è generata dalla sola azione del peso proprio.

Si procede con la verifica della gru base 400.8 e successivamente della gru 400.6+J4.

Gru base 400.8
Verifica della sezione S_{12}: 8° braccio sfilabile

A = 27.3 cm^2
I_x = 1473 cm^4
I_y = 395 cm^4
$W_{x1} \cong W_{x3}$ = 126.3 cm^3
W_{x2} = 177.3 cm^3
W_y = 85.8 cm^3

<u>Azioni sul piano verticale</u>

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(8)} \cdot g = 1.1 \cdot (74 + 52) \cdot 9.81 \cong 1360N$$

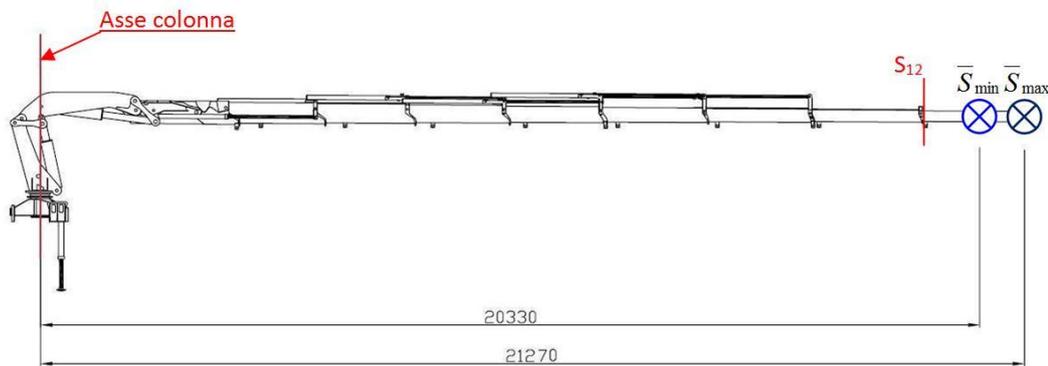
$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.16 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10242N$$

Dove $m_{(8)}$ comprende la massa dell'ottavo sfilo e del relativo martinetto idraulici di sfilamento. Va precisato che, a valle della sezione S_4, alla massa delle parti

sospese non partecipa la camicia dello stelo dell'ottavo martinetto,ma poiché se ne conosce solo la massa totale e poiché la $\Delta\sigma_{Sd}$ è il risultato di una differenza, considerando la stessa massa in entrambi i termini (σ_{max} e σ_{min}), il risultato non varia.

$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{12}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_{12}}\right) =$$
$$= 1360 \cdot (20.33 - 19.09) + 10242 \cdot (21.40 - 19.09) = 25345 Nm$$
$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{12}}\right) = 1360 \cdot (20.33 - 19.09) = 1686 Nm$$
$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{28091 - 105967}{126.5} = 187.3 \frac{N}{mm^2}$$
$$\Delta\sigma_{Sd} = 187.3 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\underline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$
$$F_{hi,\max,8°sfilo} = \left(m_{(8)} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (126 + 900) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 881 N$$
$$F_{hi,\min,8°sfilo} = m_{(8)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 126 \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 108 N$$
$$\underline{S}_{\max,8°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,8°sfilo} = 1.05 \cdot 881 \cong 925 N$$
$$\underline{S}_{\min,8°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,8°sfilo} = 1.05 \cdot 108 \cong 113 N$$

$\underline{S}_{max}$ ed $\underline{S}_{min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\Big|_{\underline{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{S_12}\cdot \mathrm{m}_{(8)} + \mathrm{d}_{Q'}\cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m}_{(8)} + \mathrm{Q})} = \frac{20.33\cdot 126 + 21.40\cdot 900}{(126+900)} = 21.27m$$

$$X_G\Big|_{\underline{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 20.33m$$

$$M_{f,o,\max} = \underline{S}_{\max}\cdot\left(X_G\Big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{12}}\right) = 925\cdot(21.27-19.09) \cong 2017N$$

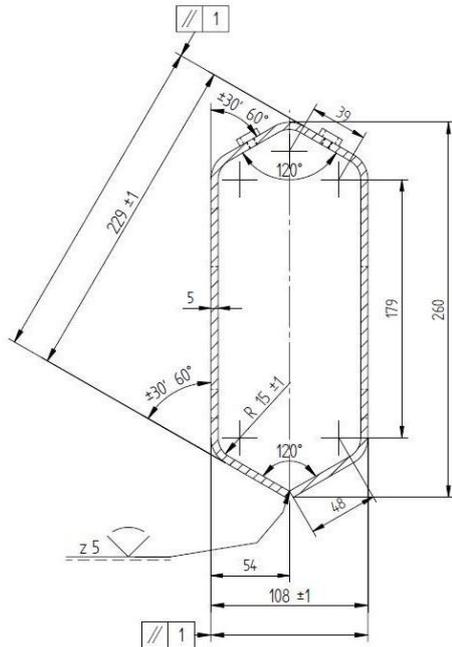
$$M_{f,o,\min} = \underline{S}_{\min}\cdot\left(X_G\Big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{12}}\right) = 113\cdot(20.33-19.09) \cong 140N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{2017-140}{85.8} = 21.9\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 21.9\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Si precisa che per il calcolo delle sollecitazioni, in questa come nelle verifiche seguenti, l'effetto del taglio non è stato considerato, in quanto genera tensioni al più nell'ordine di qualche newton, pertanto trascurabile.

Verifica della sezione S_{11}: 7° braccio sfilabile

$A = 31.1\ cm^2$

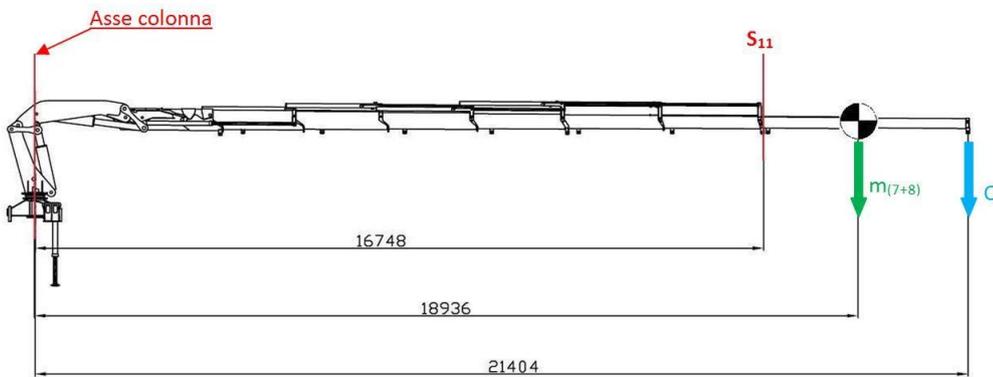
$I_x = 2143\ cm^4$

$I_y = 622\ cm^4$

$W_{x1} \cong W_{x3} = 163.5\ cm^3$

$W_{x2} = 225.8\ cm^3$

$W_y = 115.1\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(7+8)} \cdot g = 1.1 \cdot (74 + 86 + 52 + 52) \cdot 9.81 \cong 2849 N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.16 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10242 N$$

Dove $m_{(7\text{-}8)}$ comprende la massa del settimo e dello sfilo e dei relativi martinetti idraulici di sfilamento. Anche in questo caso bisogna precisare che a valle della sezione S_4, alla massa delle parti sospese non partecipa la camicia del secondo martinetto. Tuttavia, poiché si conosce la massa totale di ambo le parti e poiché la $\Delta\sigma_{Sd}$ è il risultato di una differenza, considerando la stessa massa in entrambi i

termini, il risultato non varia. Analoghe considerazioni vengono fatte anche per le altre sezioni verificate.

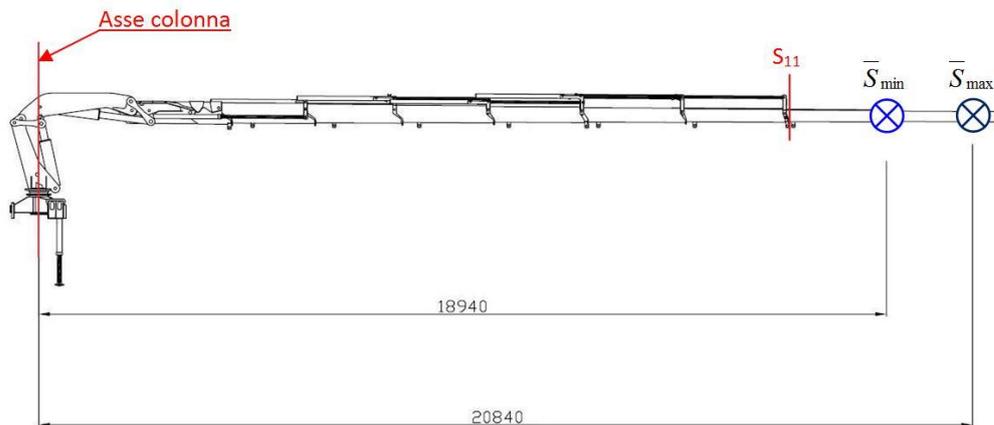
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{11}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_{11}}\right) =$$
$$= 2849 \cdot (18.94 - 16.75) + 10242 \cdot (21.40 - 16.75) \cong 53865\,Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{11}}\right) = 2849 \cdot (18.94 - 16.75) = 6239\,Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{53865 - 6239}{163.5} = 291.3\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 291.3\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

<u>Azioni sul piano orizzontale</u>

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,7°sfilo} = \left(m_{(7+8)} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (264 + 900) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 999N$$

$$F_{hi,\min,7°sfilo} = m_{(7+8)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 264 \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 227N$$

$$\overline{S}_{\max,7°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,7°sfilo} = 1.05 \cdot 999 \cong 1049N$$

$$\overline{S}_{\min,7°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,7°sfilo} = 1.05 \cdot 227 \cong 238N$$

<u>S</u> max ed <u>S</u> min agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\bar{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{P'} \cdot \mathrm{m}_{(7+8)} + \mathrm{d}_{Q'} \cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m}_{(7+8)} + \mathrm{Q})} = \frac{18.94 \cdot 264 + 21.40 \cdot 900}{(264 + 900)} = 20.84m$$

$$X_G\big|_{\bar{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 18.94m$$

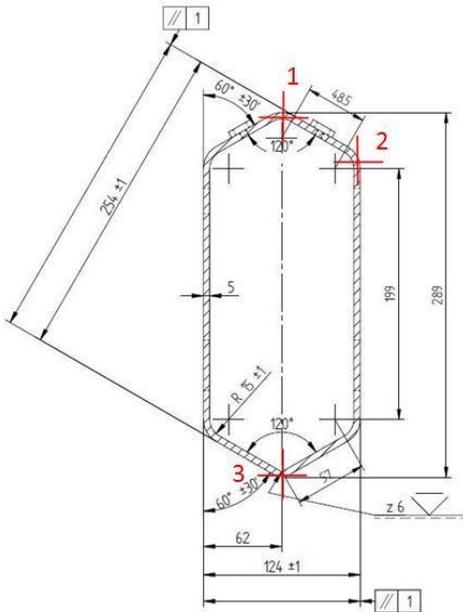
$$M_{f,o,\max} = \bar{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{11}} \right) = 1049 \cdot (20.84 - 16.74) \cong 4301N$$

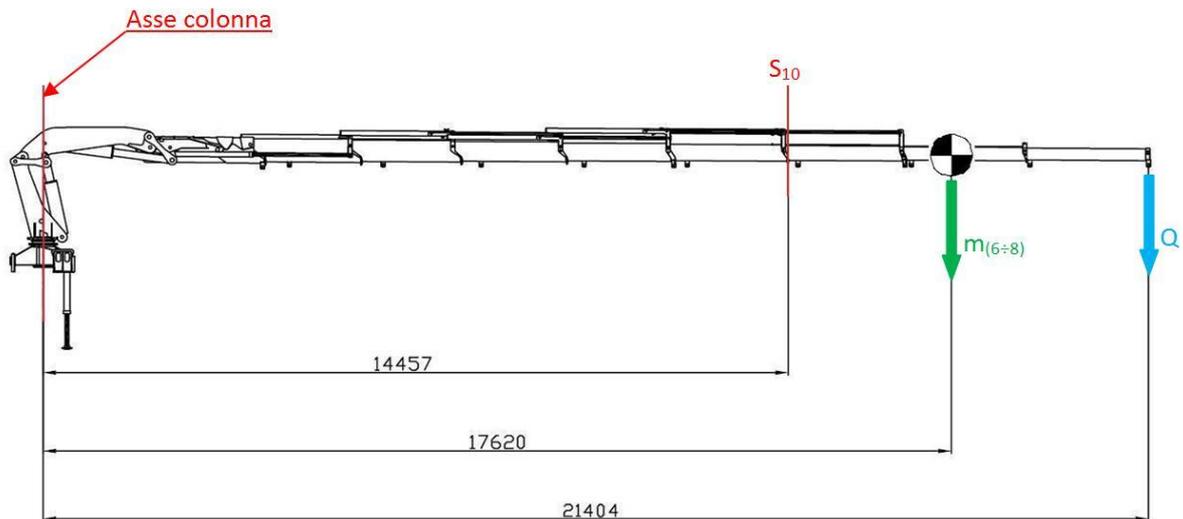
$$M_{f,o,\min} = \bar{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{11}} \right) = 238 \cdot (18.49 - 16.74) \cong 417N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{4301 - 417}{115.1} \cong 33.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 33.8 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_{10}: 6° braccio sfilabile

$A = 35\ cm^2$
$I_x = 2998\ cm^4$
$I_y = 921.8\ cm^4$
$W_{x1} \cong W_{x3} = 205.3\ cm^3$
$W_{x2} = 290.2\ cm^3$
$W_y = 148.6\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(6\div8)} \cdot g = 1.1 \cdot (86 + 103 + 127 + 52 + 52 + 52) \cdot 9.81 \cong 4521 N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418 N$$

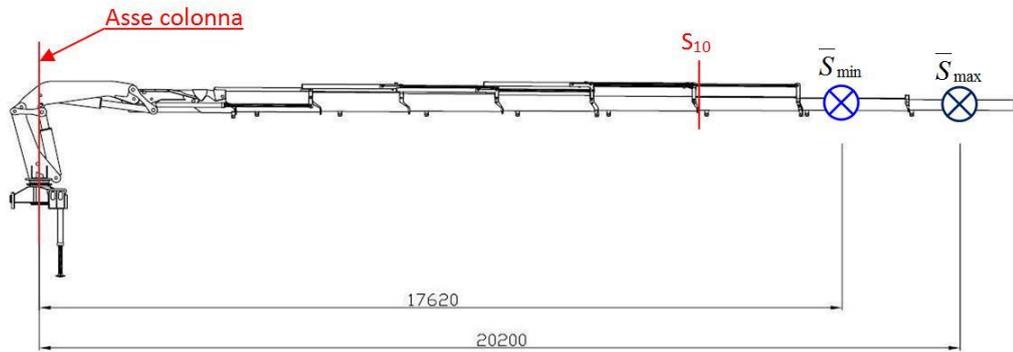
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{10}}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_{10}}) =$$
$$= 4521 \cdot (17.62 - 14.46) + 10418 \cdot (21.40 - 14.46) \cong 86587 Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{10}}) = 4521 \cdot (17.62 - 14.46) = 14286 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{86587 - 14286}{205.3} = 352.2\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 352.2\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,6°sfilo} = \left(m_{(6\div8)} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (419 + 900) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1132N$$

$$F_{hi,\min,6°sfilo} = m_{(6\div8)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 419 \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 360N$$

$$\overline{S}_{\max,6°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,6°sfilo} = 1.05 \cdot 1132 \cong 1189N$$

$$\overline{S}_{\min,6°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,6°sfilo} = 1.05 \cdot 360 \cong 378N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \mathrm{m}_{(6\div8)} + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m}_{(6\div8)} + \mathrm{Q})} = \frac{17.62 \cdot 419 + 21.40 \cdot 900}{(419 + 900)} = 20.20m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 17.62m$$

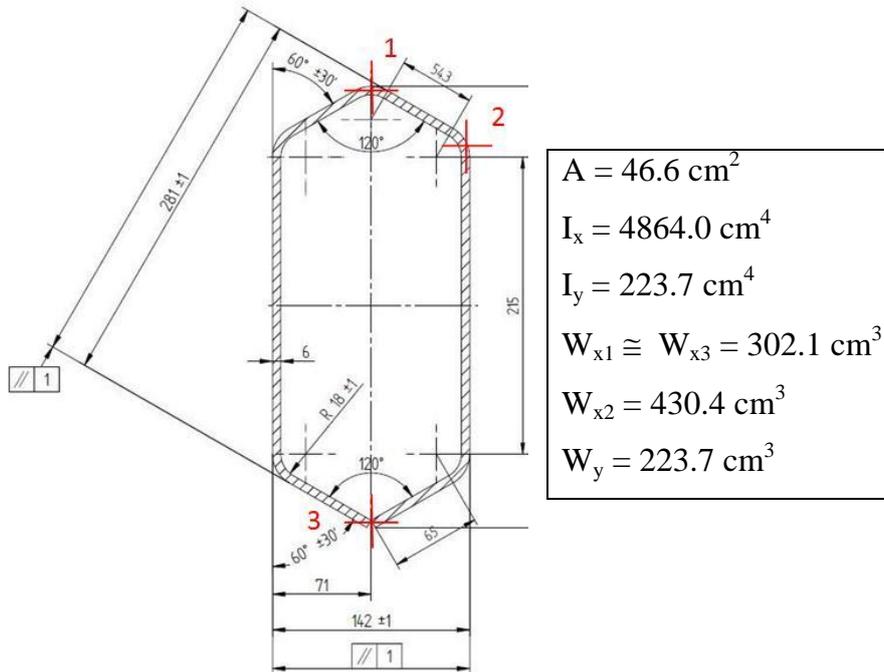
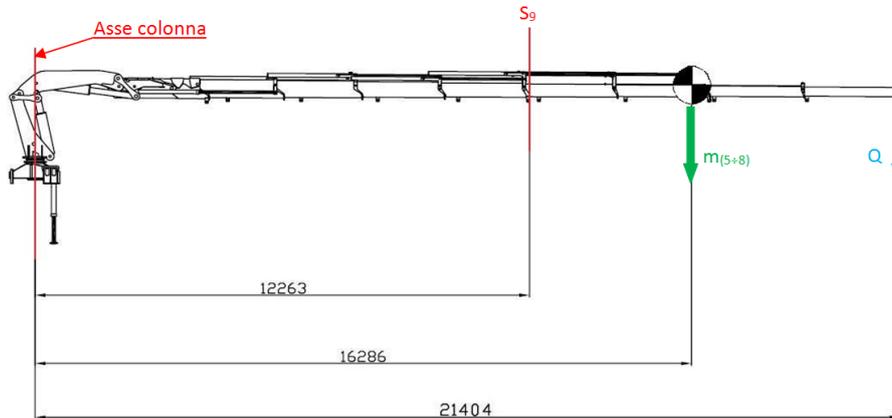
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{10}}\right) = 1189 \cdot (20.20 - 14.76) \cong 6825N$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{10}}\right) = 378 \cdot (17.62 - 14.46) \cong 1195N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{6825 - 1195}{148.6} \cong 33.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 33.8 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Verifica della sezione S_9: 5° braccio sfilabile

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(5\div8)} \cdot g = 1.1 \cdot (74+86+103+127+52+52+52+51) \cdot 9.81 \cong 6442 N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418 N$$

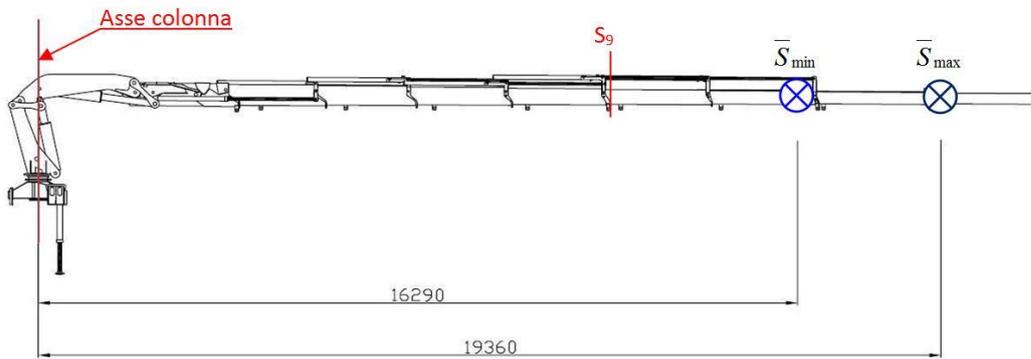
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_9}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_9}) =$$
$$= 6442 \cdot (16.29 - 12.26) + 10418 \cdot (21.40 - 12.26) \cong 121182 Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_9}) = 6442 \cdot (16.29 - 12.26) = 25961 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{121182 - 25961}{302.1} = 315.2\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 315.2\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,5°sfilo} = \left(m_{(5\div8)} + Q\right)\cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (597 + 900)\cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1285N$$

$$F_{hi,\min,5°sfilo} = m_{(5\div8)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 597 \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 512N$$

$$\overline{S}_{\max,5°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,5°sfilo} = 1.05 \cdot 1285 \cong 1349N$$

$$\overline{S}_{\min,5°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,5°sfilo} = 1.05 \cdot 515 \cong 538N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\Big|_{\overline{S}\max} = \frac{d_{P'} \cdot m_{(5\div8)} + d_{Q'} \cdot Q}{(m_{(5\div8)} + Q)} = \frac{16.29 \cdot 597 + 21.40 \cdot 900}{(597 + 900)} = 19.36m$$

$$X_G\Big|_{\overline{S}\min} = d_{P'} = 16.29m$$

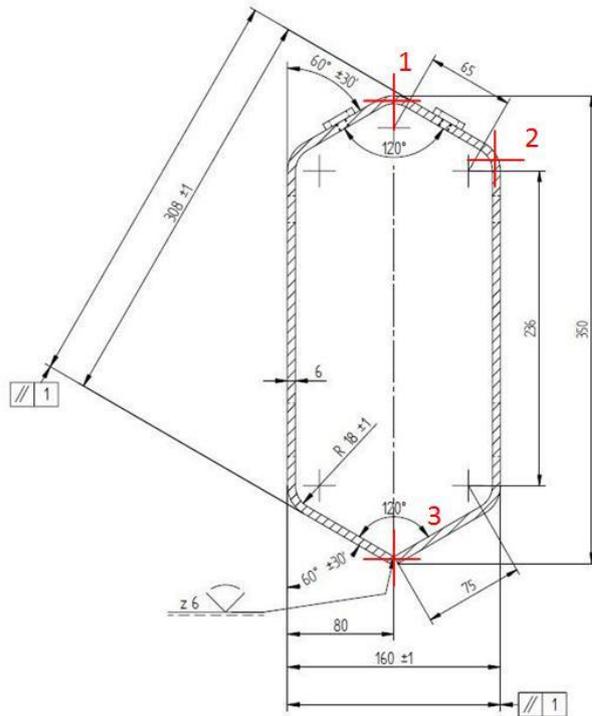
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\Big|_{\underline{S}\max} - d_{S_9}\right) = 1349 \cdot (19.36 - 12.26) \cong 9578N$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\Big|_{\underline{S}\min} - d_{S_9}\right) = 538 \cdot (16.29 - 12.26) \cong 2168N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \frac{M_{fo,max}}{W_y} - \frac{M_{fo,min}}{W_y} = \frac{9578 - 2168}{223.7} \cong 33.1 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 33.1 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_8: 4° braccio sfilabile

$A = 51.8\ cm^2$

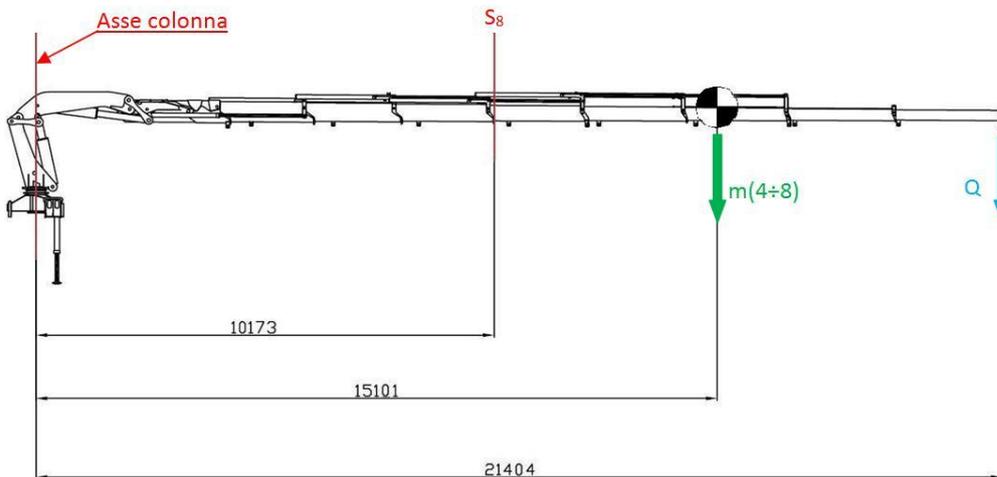
$I_x = 6639\ cm^4$

$I_y = 2250\ cm^4$

$W_{x1} \cong W_{x3} = 374.0\ cm^3$

$W_{x2} = 521.9\ cm^3$

$W_y = 281.3\ cm^3$

<u>Azioni sul piano verticale</u>

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(4\div8)} \cdot g = 1.1 \cdot (74+86+103+127+133+52+52+52+51+49) \cdot 9.81 =$$
$$\cong 8406N$$
$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418N$$

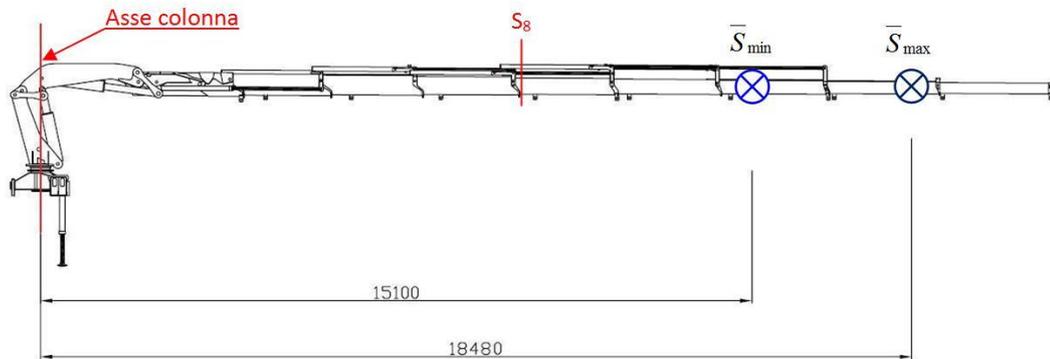
$$M_{f,v,\max} = P'\cdot\left(d_{P'} - d_{S_8}\right) + Q'\cdot\left(d_{Q'} - d_{S_8}\right) =$$
$$= 8406\cdot(15.10 - 10.17) + 10418\cdot(21.40 - 10.27) \cong 158436\,Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P'\cdot\left(d_{P'} - d_{S_8}\right) = 8406\cdot(15.10 - 10.17) = 41442\,Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{158436 - 41442}{374.0} = 312.8\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 312.8\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,4°sfilo} = \left(m_{(4\div8)} + Q\right)\cdot g\cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (779 + 900)\cdot 9.81\cdot tg(5°) \cong 1441N$$

$$F_{hi,\min,4°sfilo} = m_{(4\div8)}\cdot g\cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 779\cdot 9.81\cdot tg(5°) \cong 669N$$

$$\overline{S}_{\max,4°sfilo} = \phi_5\cdot F_{hi,\max,4°sfilo} = 1.05\cdot 1441 \cong 1513N$$

$$\overline{S}_{\min,4°sfilo} = \phi_5\cdot F_{hi,\min,4°sfilo} = 1.05\cdot 669 \cong 702N$$

$\overline{S}_{\max}$ ed $\overline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{d_{P'}\cdot m_{(4\div8)} + d_{Q'}\cdot Q}{(m_{(4\div8)} + Q)} = \frac{15.10\cdot 779 + 21.40\cdot 900}{(779 + 900)} = 18.48m$$

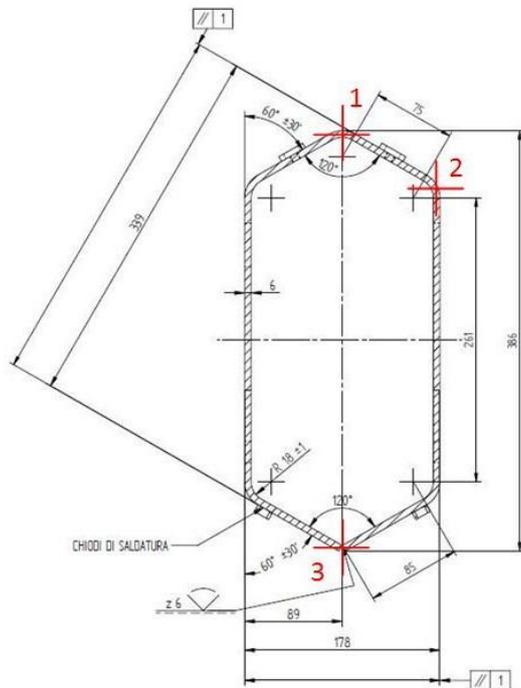
$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = d_{P'} = 15.10m$$

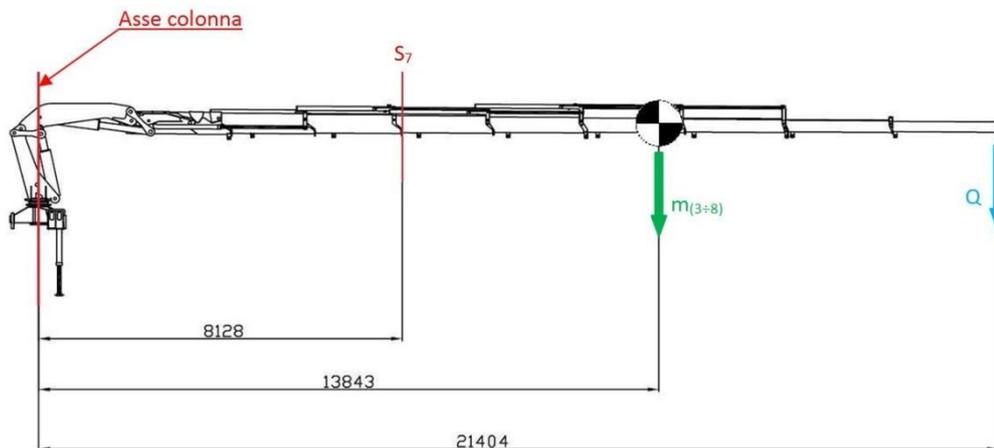
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G \big|_{\underline{S}\max} - d_{S_8} \right) = 1513 \cdot (18.48 - 10.17) \cong 12573N$$
$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G \big|_{\underline{S}\min} - d_{S_8} \right) = 702 \cdot (15.10 - 10.17) \cong 3461N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{12573 - 3461}{281.3} \cong 32.4 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 32.4 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_7: 3° braccio sfilabile

$A = 57.1\ cm^2$
$I_x = 8800\ cm^4$
$I_y = 3074\ cm^4$
$W_{x1} \cong W_{x3} = 453.1\ cm^3$
$W_{x2} = 621.9\ cm^3$
$W_y = 345.4\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(3 \div 8)} \cdot g =$$
$$= 1.1 \cdot (74 + 86 + 103 + 127 + 133 + 134 + 52 + 52 + 52 + 51 + 49 + 53) \cdot 9.81 \cong 9950N$$
$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418N$$

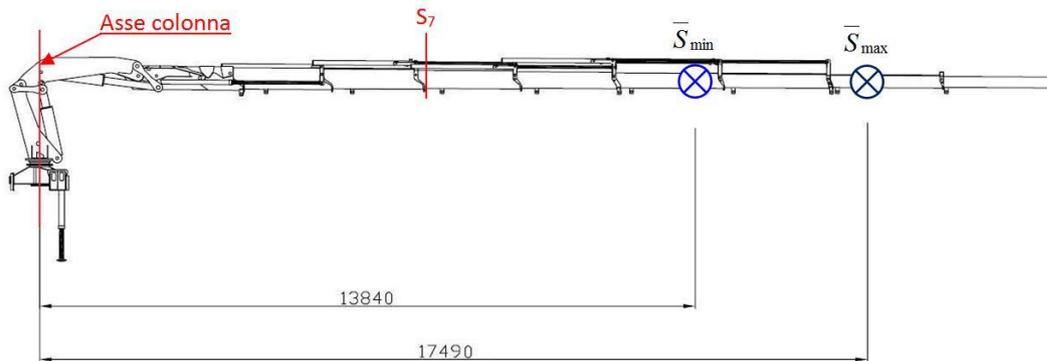
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_7}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_7}) =$$
$$= 9950 \cdot (13.84 - 8.13) + 10418 \cdot (21.40 - 8.13) \cong 195061Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P'\cdot(d_{P'} - d_{S_7}) = 9950\cdot(13.84 - 8.13) = 56815Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{195061 - 56815}{453.1} = 305.1\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 305.1\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,3°sfilo} = (m_{(3\div8)} + Q)\cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (996 + 900)\cdot 9.81\cdot tg(5°) \cong 1602N$$

$$F_{hi,\min,3°sfilo} = m_{(3\div8)} \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = 996\cdot 9.81\cdot tg(5°) \cong 829N$$

$$\overline{S}_{\max,3°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,3°sfilo} = 1.05\cdot 1602 \cong 1682N$$

$$\overline{S}_{\min,3°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,3°sfilo} = 1.05\cdot 829 \cong 870N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \mathrm{m_{(3\div8)}} + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m_{(3\div8)}} + \mathrm{Q})} = \frac{13.84\cdot 996 + 21.40\cdot 900}{(996 + 900)} = 17.49m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 13.84m$$

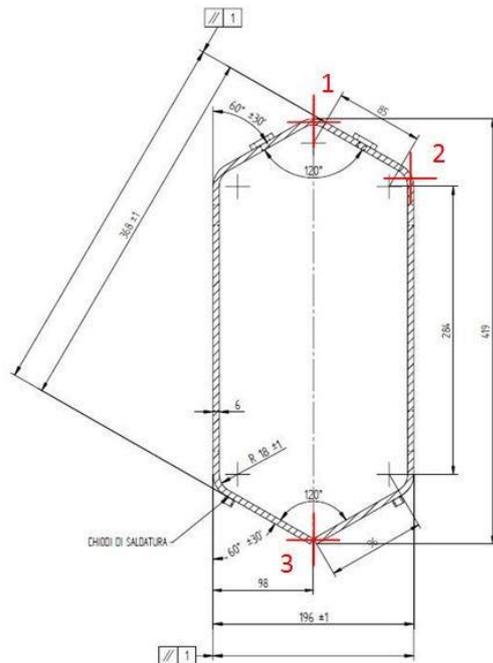
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_7}\right) = 1682\cdot(17.49 - 8.13) \cong 15744N$$

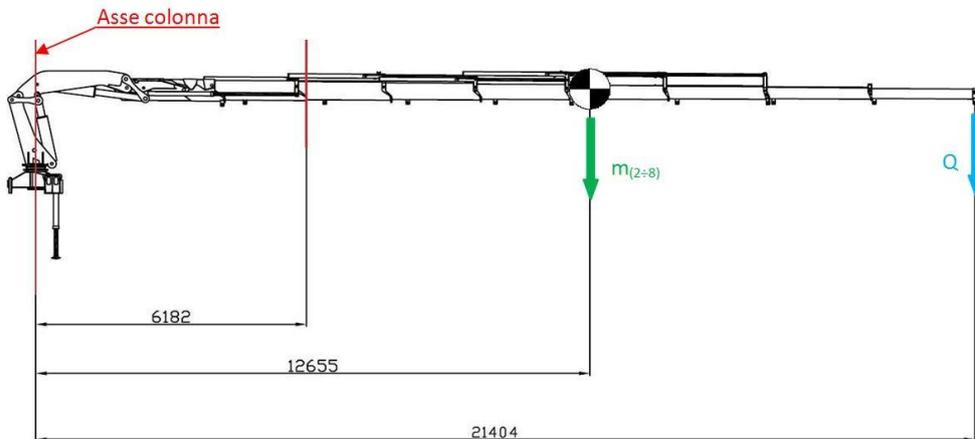
$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_7}\right) = 870\cdot(13.84 - 8.13) \cong 4968N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{15774 - 4968}{345.4} \cong 31.2 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 31.2 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_6: 2° braccio sfilabile

$A = 62.5\ cm^2$
$I_x = 14.455\ cm^4$
$I_y = 4077\ cm^4$
$W_{x1} \cong W_{x3} = 542.9\ cm^3$
$W_{x2} = 752.8\ cm^3$
$W_y = 416.0\ cm^3$

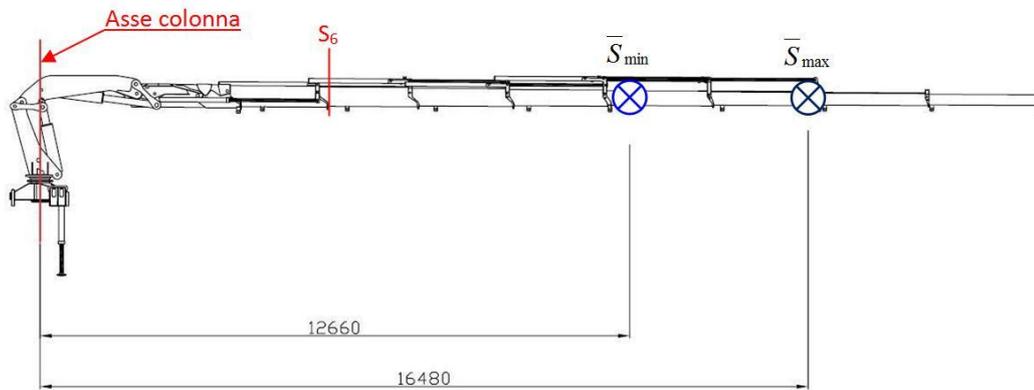
Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(2\div8)} \cdot g =$$
$$= 1.1 \cdot (74 + 86 + 103 + 127 + 133 + 134 + 142 + 52 + 52 + 52 + 51 + 49 + 53 + 52) \cdot 9.81 =$$
$$\cong 12518 N$$
$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418 N$$
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_6}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_6}) =$$
$$= 12518 \cdot (12.66 - 6.18) + 10418 \cdot (21.40 - 6.18) \cong 239679 Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_6}) = 12518 \cdot (12.66 - 6.18) = 81117 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{239679 - 81117}{542.9} = 292.1 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 292.1 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,2°sfilo} = (m_{(2\div8)} + Q) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (1160 + 900) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1768N$$

$$F_{hi,\min,2°sfilo} = m_{(2\div8)} \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = 1160 \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 956N$$

$$\overline{S}_{\max,2°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,2°sfilo} = 1.05 \cdot 1768 \cong 1856N$$

$$\overline{S}_{\min,2°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,2°sfilo} = 1.05 \cdot 956 \cong 1004N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{d_{P'} \cdot m_{(2\div8)} + d_{Q'} \cdot Q}{(m_{(2\div8)} + Q)} = \frac{12.66 \cdot 1160 + 21.40 \cdot 900}{(1160 + 900)} = 16.48m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = d_{P'} = 12.66m$$

$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_6}\right) = 1856 \cdot (16.48 - 6.18) \cong 19117N$$

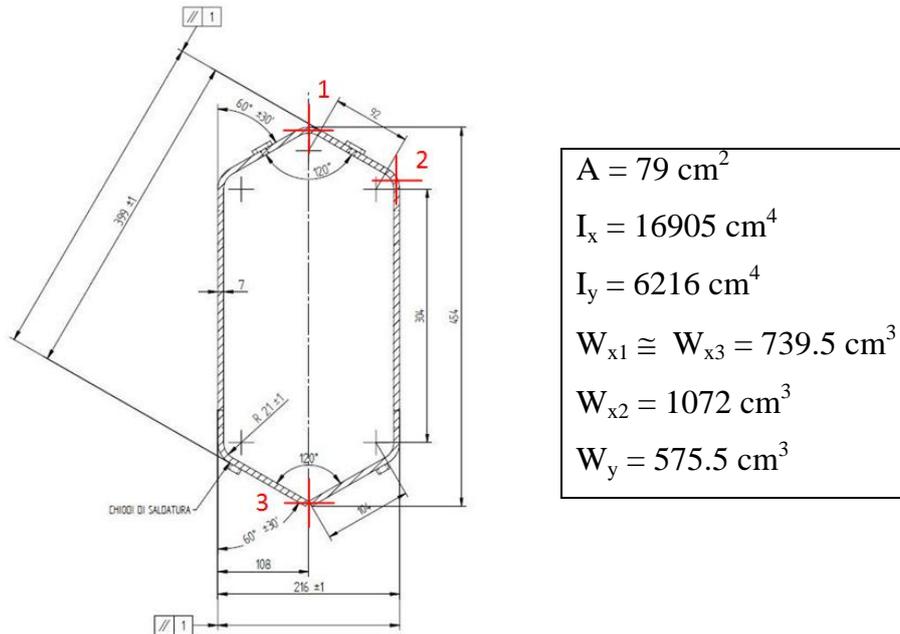
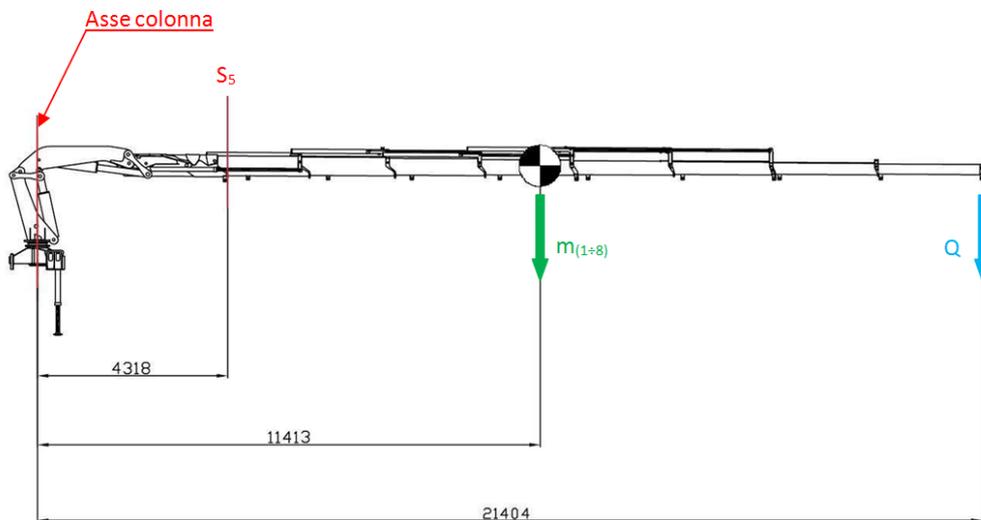
$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_6}\right) = 1004 \cdot (12.66 - 6.18) \cong 6506N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{19117 - 6506}{416.0} \cong 30.3\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 30.3\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_5: 1° braccio sfilabile

$A = 79\ cm^2$
$I_x = 16905\ cm^4$
$I_y = 6216\ cm^4$
$W_{x1} \cong W_{x3} = 739.5\ cm^3$
$W_{x2} = 1072\ cm^3$
$W_y = 575.5\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(1 \div 8)} \cdot g = 1.1 \cdot \begin{pmatrix} 74+86+103+127+133+134+142+175+ \\ +52+52+52+51+49+53+52+50 \end{pmatrix} \cdot 9.81 \cong 14976 N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418 N$$

$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_5}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_5}\right) =$$

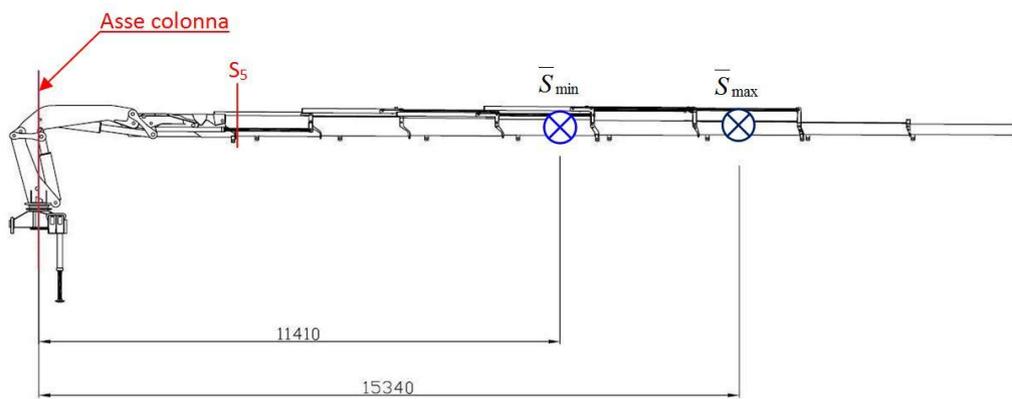
$$= 14496 \cdot (11.41 - 4.32) + 10418 \cdot (21.40 - 4.32) \cong 283907 Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_5}\right) = 14496 \cdot (11.41 - 4.32) = 105907 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{287907 - 105967}{739.5} = 240.6 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 240.6 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,1°sfilo} = \left(m_{(1\div8)} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (1385 + 900) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1961 N$$

$$F_{hi,\min,1°sfilo} = m_{(1\div8)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 1385 \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1189 N$$

$$\overline{S}_{\max,1°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,1°sfilo} = 1.05 \cdot 1961 \cong 2059 N$$

$$\overline{S}_{\min,1°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,1°sfilo} = 1.05 \cdot 1189 \cong 1248 N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \mathrm{m_{(1\div8)}} + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m_{(1\div8)}} + \mathrm{Q})} = \frac{11.41 \cdot 1385 + 21.40 \cdot 900}{(1385 + 900)} = 15.34 m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 11.41 m$$

$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_5}\right) = 2059 \cdot (15.34 - 4.32) \cong 22690 N$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_5}\right) = 1248 \cdot (11.41 - 4.32) \cong 8848 N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{22690 - 8848}{575.5} \cong 24.1 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 24.1 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_4: braccio secondario

$A = 85.6\ cm^2$
$I_x = 21377\ cm^4$
$I_y = 8050\ cm^4$
$W_{x1} \cong W_{x3} = 867.2\ cm^3$
$W_{x2} = 1195\ cm^3$
$W_y = 682.2\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(2^{nd}+1\div 8)} \cdot g = 1.1 \cdot \begin{pmatrix} 74+86+103+127+133+134+142+175+370+ \\ +52+52+52+51+49+53+52+50+210 \end{pmatrix} \cdot 9.81 =$$

$$\cong 21204N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418N$$

$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_4}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_4}) =$$

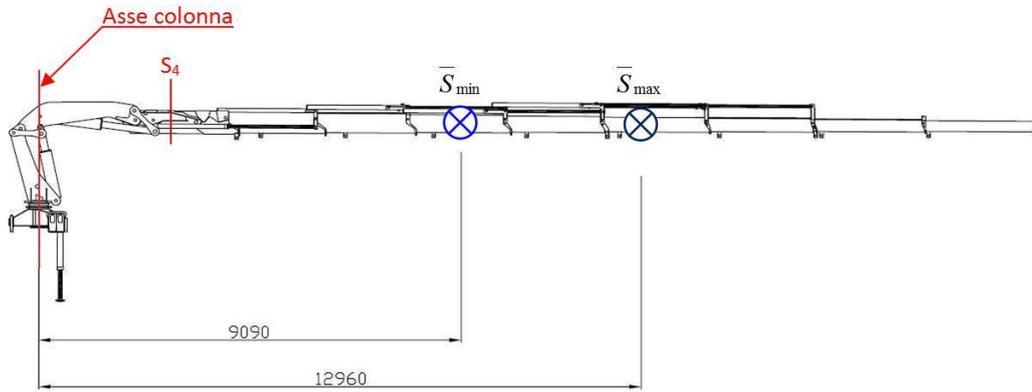
$$= 21204 \cdot (9.09 - 2.88) + 10418 \cdot (21.40 - 2.88) \cong 324618Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_4}) = 21204 \cdot (9.09 - 2.88) = 131677Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{324618 - 131677}{867.2} = 222.5\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 222.5\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,2^{nd}} = \left(m_{\left(2^{nd}+1\div 8\right)} + Q\right)\cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(1965+900\right)\cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 2459N$$

$$F_{hi,\min,2^{nd}} = m_{\left(2^{nd}+1\div 8\right)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 1965 \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 1686N$$

$$\overline{S}_{\max,2^{nd}} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,2^{nd}} = 1.05 \cdot 2459 \cong 2582N$$

$$\overline{S}_{\min,2^{nd}} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,2^{nd}} = 1.05 \cdot 1686 \cong 1170N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\Big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{P'} \cdot \mathrm{m}_{(2^{nd}+1\div 8)} + \mathrm{d}_{Q'} \cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m}_{(2^{nd}+1\div 8)} + \mathrm{Q})} = \frac{9.09 \cdot 1965 + 21.40 \cdot 900}{(1965+900)} = 12.96m$$

$$X_G\Big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 9.09m$$

$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\Big|_{\underline{S}\max} - d_{S_4}\right) = 2582 \cdot \left(12.96 - 2.88\right) \cong 28748N$$

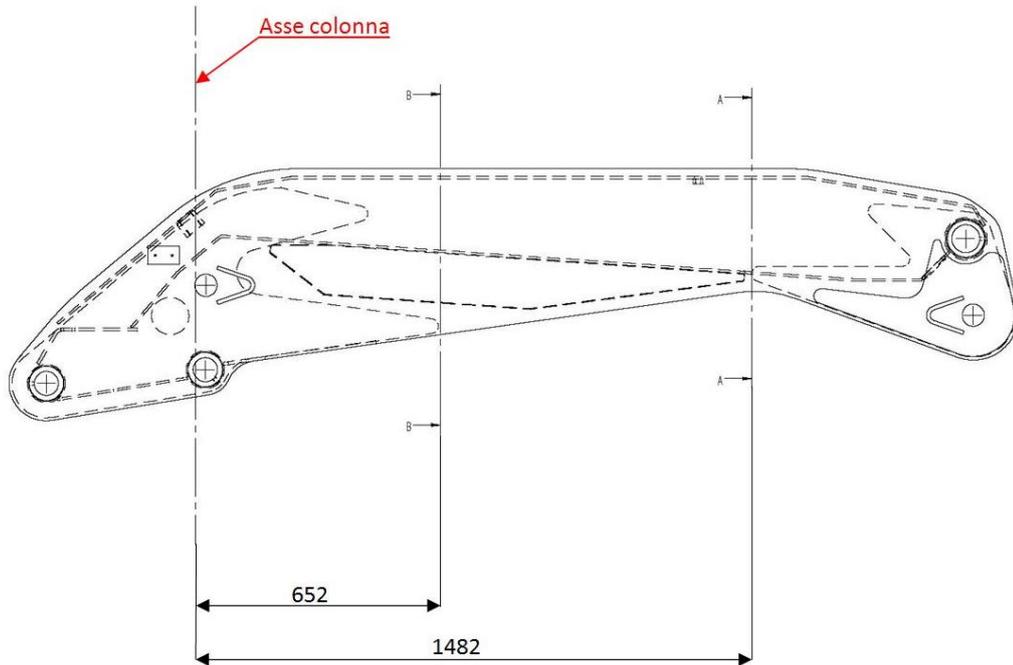
$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\Big|_{\underline{S}\min} - d_{S_4}\right) = 1170 \cdot \left(9.09 - 2.88\right) \cong 7266N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{28748 - 7266}{682.2} \cong 31.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 31.5 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

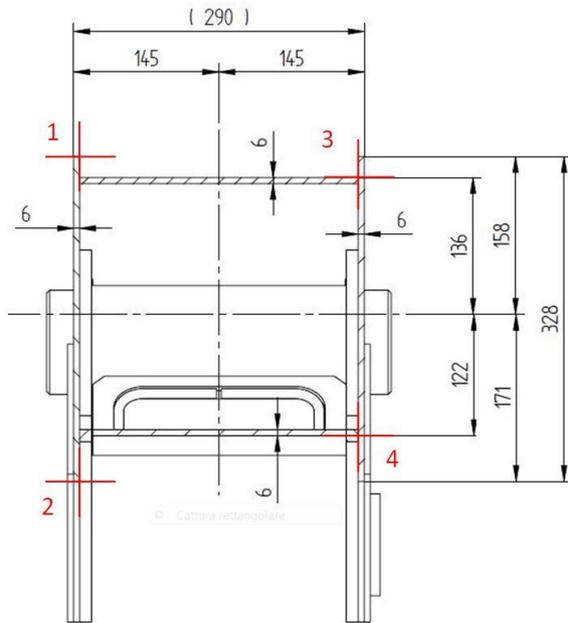
Verificata

Verifica della sezione S_2: braccio principale

In questo elemento le sezioni critiche sono due, come mostrato in figura, e sono quelle in cui i rinforzi saldati sono minori o assenti.

Le configurazioni più gravose sono due:

1. braccio principale in posizione orizzontale, allineato col pacco bracci anch'esso sull'orizzontale;
2. braccio principale in posizione verticale e pacco bracci sull'orizzontale.

Braccio principale e pacco bracci allineati sull'orizzontale

Verifica della sezione A-A

$A = 72.36\ cm^2$
$I_x = 8873\ cm^4$
$I_y = 10064\ cm^4$
$W_{x1} = 561.5\ cm^3$
$W_{x2} = 518.8\ cm^3$
$W_{x3} = 652.4\ cm^3$
$W_{x4} = 727.2\ cm^3$
$W_y = 694.0\ cm^3$
$A_u = 71568\ mm^2$

La massa della parte di braccio principale a valle della sezione considerata mediante software non si riesce a determinare e la misura reale comporterebbe una verifica distruttiva di componenti strutturali con conseguenti costi elevati.

Il baricentro del braccio principale si è visto cadere all'incirca a metà del componente stesso.

Per semplicità di calcolo, considerando dove sono posizionati i piani di sezione, si suppone che la massa degli elementi a valle della sezione in esame, sia pari ad 1/3 di quella totale.

Stessa considerazione viene fatta per il martinetto principale.

$$m_{1^{st}(braccio+martinetto)} = 312 + 210 = 522kg$$

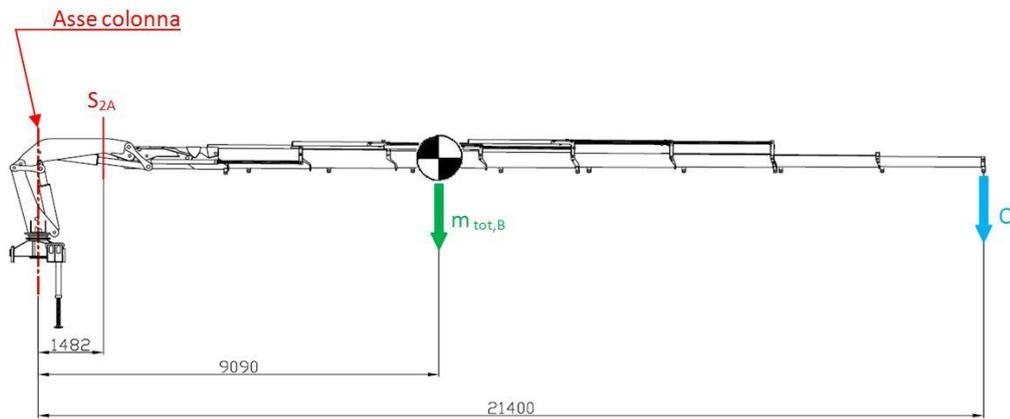
$$m_{utile-A} = \frac{1}{3} m_{1^{st}(braccio+martinetto)} = \frac{522}{3} = 174kg$$

Per quanto riguarda i baricentri, si fanno le seguenti considerazioni:

- la massa dell'intero pacco bracci è 1965kg il cui baricentro si trova ad una distanza di 9.09m dall'asse colonna(vedi verifica braccio secondario, sez. S_4);

- la massa della parte di braccio principale è di 174kg ad una distanza molto prossima a quella della sezione A-A(~40cm) che genera una variazione di momento flettente di ~60Nm;

Sulla base di queste osservazioni si ritiene che la variazione della posizione del baricentro sia trascurabile.

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{tot,A} \cdot g = 1.1 \cdot (174 + 1965) \cdot 9.81 \cong 23081N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418N$$

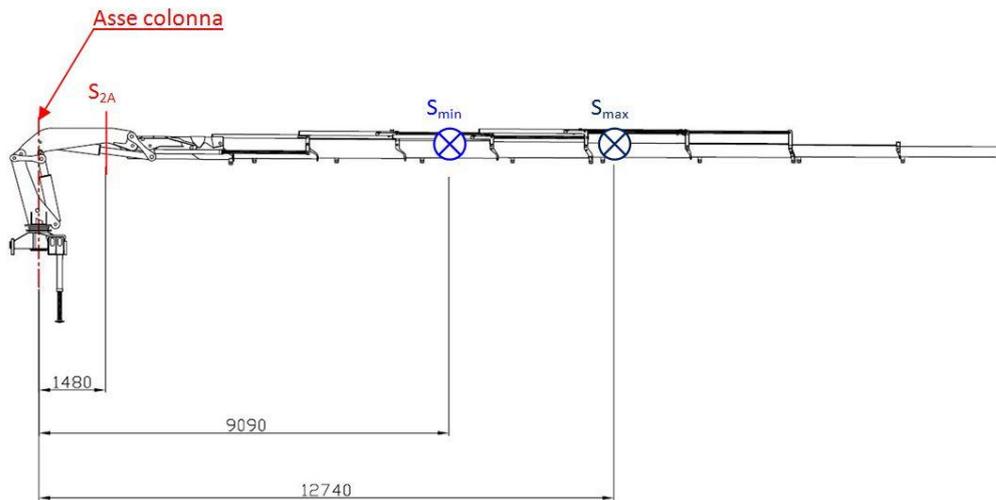
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{2A}}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_{2A}}) =$$
$$= 23081 \cdot (9.09 - 1.48) + 10418 \cdot (21.40 - 1.48) \cong 383173Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{2A}}) = 23081 \cdot (9.09 - 1.48) = 175646Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{383173 - 175646}{518.8} = 400.0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 400.0 \frac{N}{mm^2} \geq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Non verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,1^{st}A} = \left(m_{tot_A} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(174 + 1965 + 900\right) \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 2608N$$

$$F_{hi,\min,1^{st}A} = m_{tot_A} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(1965 + 174\right) \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 1836N$$

$$\overline{S}_{\max,1^{st}A} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,1^{st}A} = 1.05 \cdot 2608 \cong 2739N$$

$$\overline{S}_{\min,1^{st}A} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,1^{st}A} = 1.05 \cdot 1836 \cong 1928N$$

$\underline{S}_{max}$ ed $\underline{S}_{min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\Big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{P'} \cdot \mathrm{m}_{tot_A} + \mathrm{d}_{Q'} \cdot \mathrm{Q}}{\mathrm{m}_{tot_A} + \mathrm{Q}} = \frac{9.09 \cdot \left(174 + 1965\right) + 21.40 \cdot 900}{174 + 1965 + 900} = 12.74m$$

$$X_G\Big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 9.09m$$

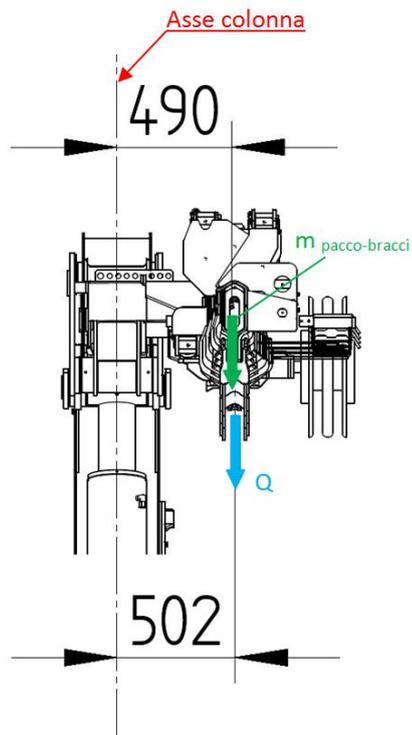
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\Big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{2A}}\right) = 2739 \cdot \left(12.74 - 1.48\right) \cong 30841N$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\Big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{2A}}\right) = 1928 \cdot \left(9.09 - 1.48\right) \cong 1462N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{30841 - 1462}{694.0} \cong 23.3\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 23.3\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

<u>Azioni torsionali</u>

Sono generate dal disassamento (inzancatura) del braccio secondario rispetto al principale.

Secondo la normativa, le azioni di tipo "τ" vanno trattate allo stesso modo delle "σ".

Il valore caratteristico dell'intervallo di sollecitazione ($\Delta\tau_c$), utilizzato per la determinazione dell'intervallo si sollecitazione ammissibile ($\Delta\sigma_{Rd}$) è identico al "$\Delta\sigma_c$". Ne consegue che anche il $\Delta\sigma_{Rd}$ sia identico.

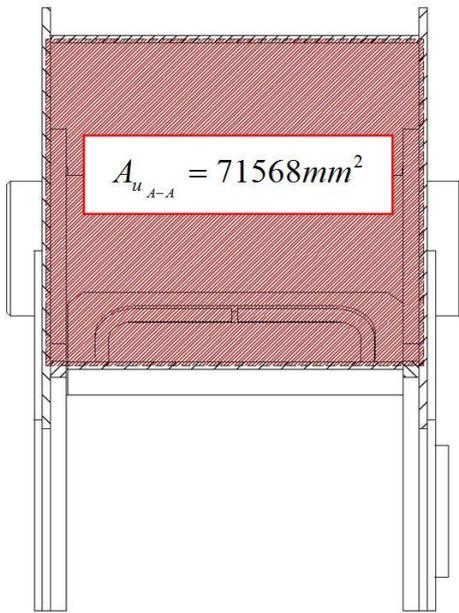
Deve dunque risultare:

$$\Delta\tau_{Sd} = \frac{M_{t,\max}}{W_t} - \frac{M_{t,\min}}{W_t} \leq \Delta\tau_{Rd} = 244.7\frac{N}{mm^2}$$

$$M_{t,\max} = m_{pacco_bracci} \cdot b_{m_{pb}} + Q \cdot b_Q = 1965 \cdot 0.49 + 900 \cdot 0.50 \cong 1415Nm$$

$$M_{t,\min} = m_{pacco_bracci} \cdot b_{m_{pb}} = 1965 \cdot 0.49 \cong 963Nm$$

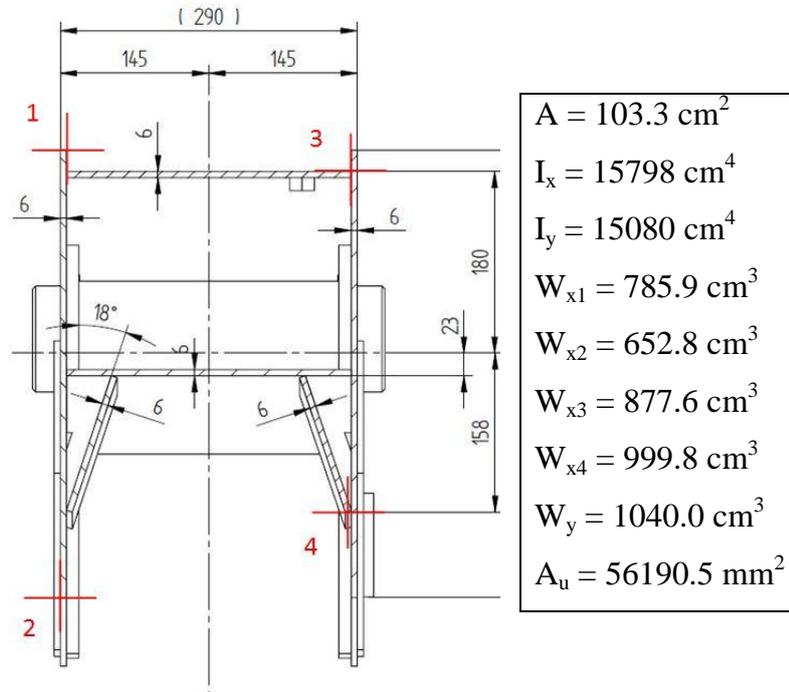
Data la natura della sezione, a parete sottile, per la determinazione di $\Delta\tau_{max}$ e $\Delta\tau_{min}$ si utilizza la teoria di Bredt, trascurando le appendici si sezione, come ipotesi a favor di sicurezza.

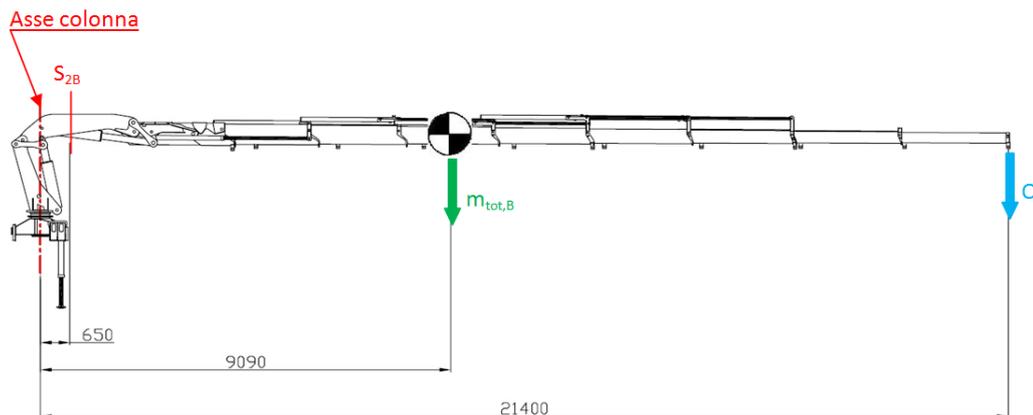
$$\tau_{M_t} = \frac{M_t}{2 \cdot s \cdot A_u}$$

$$\tau_{M_t\,\min} = \frac{M_{t,\min}}{2 \cdot s \cdot A_u} = \frac{963 \cdot 10^3}{2 \cdot 6 \cdot 71568} \cong 1.1 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\tau_{Sd} = \tau_{\max} - \tau_{\min} = 1.6 - 1.1 = 0.5 \frac{N}{mm^2}$$

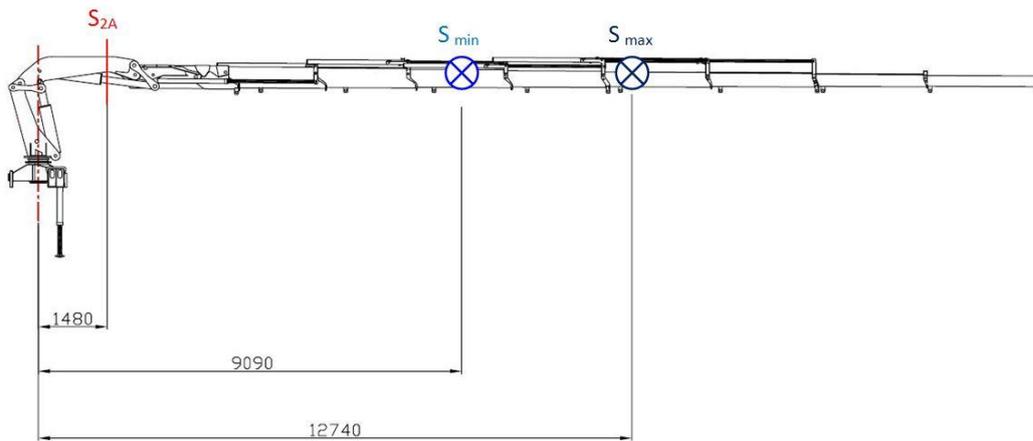
$$\Delta\tau_{Sd} = 0.5 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\tau_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Verifica della sezione B-B

Si applicano le stesse considerazioni effettuate per il caso della sezione A-A, supponendo, però, che la massa degli elementi a valle della sezione B-B sia 2/3 della totale.

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{tot,B} \cdot g = 1.1 \cdot (348 + 1965) \cdot 9.81 \cong 24960N$$
$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418N$$
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{2B}}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_{2B}}) =$$
$$= 24960 \cdot (9.09 - 0.65) + 10418 \cdot (21.40 - 0.65) \cong 426836Nm$$
$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{2B}}) = 24960 \cdot (9.09 - 0.65) = 210662Nm$$
$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{426836 - 210662}{652.8} = 331.2 \frac{N}{mm^2}$$
$$\Delta\sigma_{Sd} = 331.2 \frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$
$$F_{hi,\max,1^{st}B} = (m_{tot_B} + Q) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (348 + 1965 + 900) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 2758N$$
$$F_{hi,\min,1^{st}B} = m_{totB} \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (1965 + 348) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1985N$$
$$\overline{S}_{\max,1^{st}B} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,1^{st}B} = 1.05 \cdot 2758 \cong 2896N$$
$$\overline{S}_{\min,1^{st}B} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,1^{st}B} = 1.05 \cdot 1985 \cong 2084N$$

$\underline{S}_{max}$ ed $\underline{S}_{min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \mathrm{m}_{tot_B} + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{\mathrm{m_{tot_B}} + \mathrm{Q}} = \frac{9.09 \cdot (348 + 1965) + 21.40 \cdot 900}{348 + 1965 + 900} = 12.54m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 9.09m$$

$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{2B}}\right) = 2896 \cdot (12.54 - 0.65) \cong 34433N$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{2B}}\right) = 2084 \cdot (9.09 - 0.65) \cong 17589N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{34433 - 17589}{1040.0} \cong 16.2\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 16.2\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

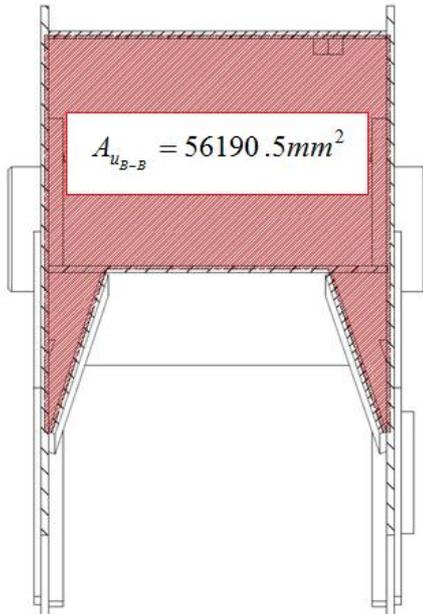
Verificata

Azioni torsionali

I momenti torcenti sono gli stessi visti per la sezione A-A:

$$M_{t,\max} \cong 1415Nm$$

$$M_{t,\min} \cong 963Nm$$

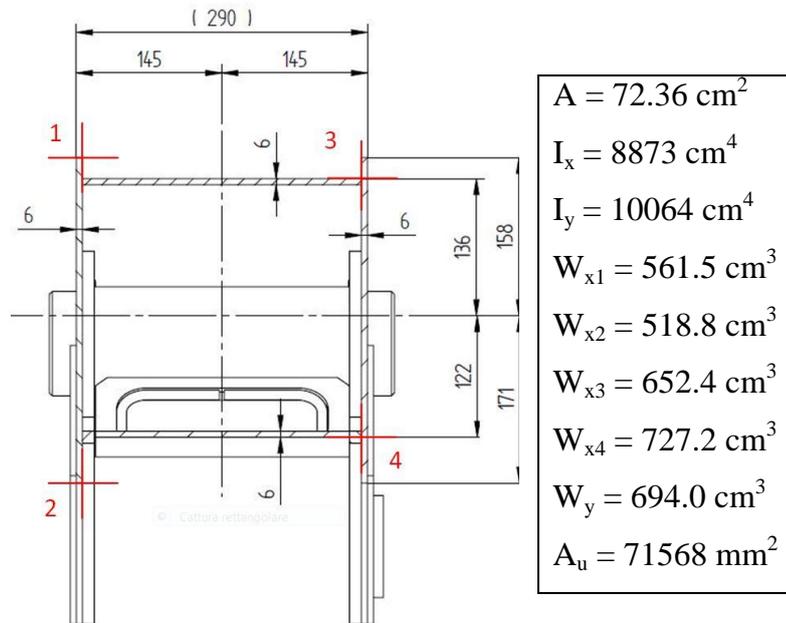
La verifica si esegue allo stesso modo.

$$\tau_{M_t\max} = \frac{M_{t,\max}}{2 \cdot s \cdot A_u} = \frac{1415 \cdot 10^3}{2 \cdot 6 \cdot 56190.5} \cong 2.10\frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{M_t\,\min} = \frac{M_{t,\min}}{2 \cdot s \cdot A_u} = \frac{963 \cdot 10^3}{2 \cdot 6 \cdot 56190.5} \cong 1.43 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\tau_{Sd} = \tau_{\max} - \tau_{\min} = 2.10 - 1.43 = 0.67 \frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Braccio principale verticale e pacco bracci orizzontale

Verifica della sezione A-A

In questa configurazione le sollecitazioni che interessano la struttura sono tre:

- Momento flettente dovuto alle masse ed ai carichi;
- Momento flettente generato dall'inzancatura[1];
- Momento torcente dovuto all'azione di rotazione dei comandi.

Azioni sul piano verticale

[1] l'inzancatura è il disassamento tra il braccio principale e quello secondario, dovuto alla geometria del collegamento tra le due parti.

$$P' = \phi_1 \cdot m_{(2^{nd} \div 8)} \cdot g = 1.1 \cdot 1965 \cdot 9.81 \cong 21204N$$

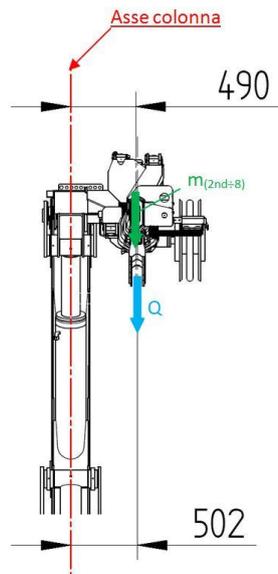
$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 900 \cdot 9.81 \cong 10418N$$

$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,A,v}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} + d_{S_{2,A,v}}\right) =$$

$$= 21204 \cdot (6.84 + 0.67) + 10418 \cdot (18.92 + 0.67) \cong 363331Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,A,v}}\right) = 21204 \cdot (6.84 + 0.67) = 154242Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{363331 - 154242}{518.8} = 403.0\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 403.0\frac{N}{mm^2} \geq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Non verificata

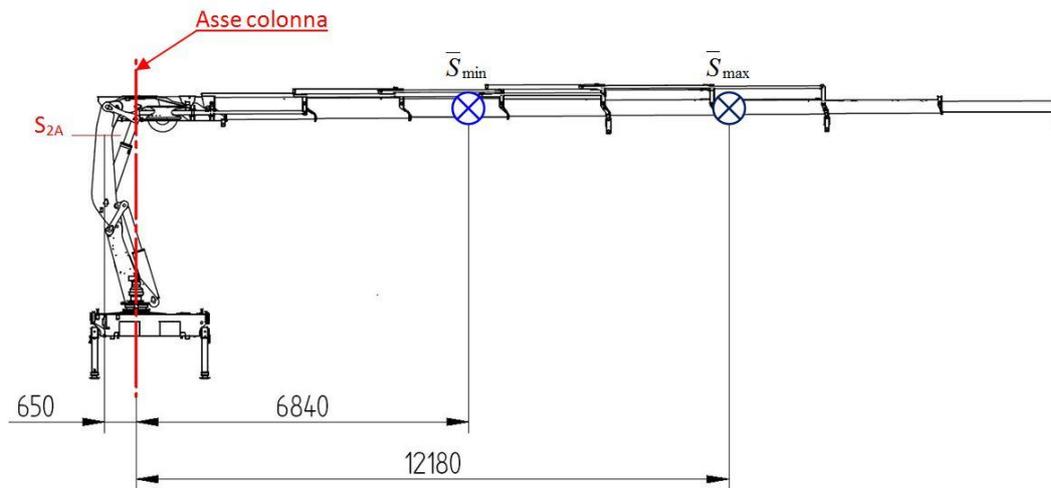
Azioni sul piano laterale

Si presentano le stesse sollecitazioni che, quando il braccio principale era sull'orizzontale, generavano la torsione dovute all'inzancatura.

$$M_{f,L,\max} = 1415 Nm$$

$$M_{f,L,\min} = 963 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,L,\max}}{W_y} - \frac{M_{f,L,\min}}{W_y} = \frac{1415 - 963}{694.0} = 1.04 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 1.04 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni torsionali

I carichi dovuti alla rotazione dei comandi sono quelli già visti durante la verifica del braccio secondario.

$$\bar{S}_{\max} = 2582N$$

$$\bar{S}_{\min} = 1170N$$

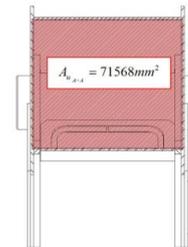
$$X_G\Big|_{\bar{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \mathrm{m}_{(2^{nd} \div 6)} + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{\mathrm{m}_{(2^{nd} \div 6)} + \mathrm{Q}} = \frac{9.09 \cdot 1965 + 21.40 \cdot 900}{1965 + 900} = 12.18m$$

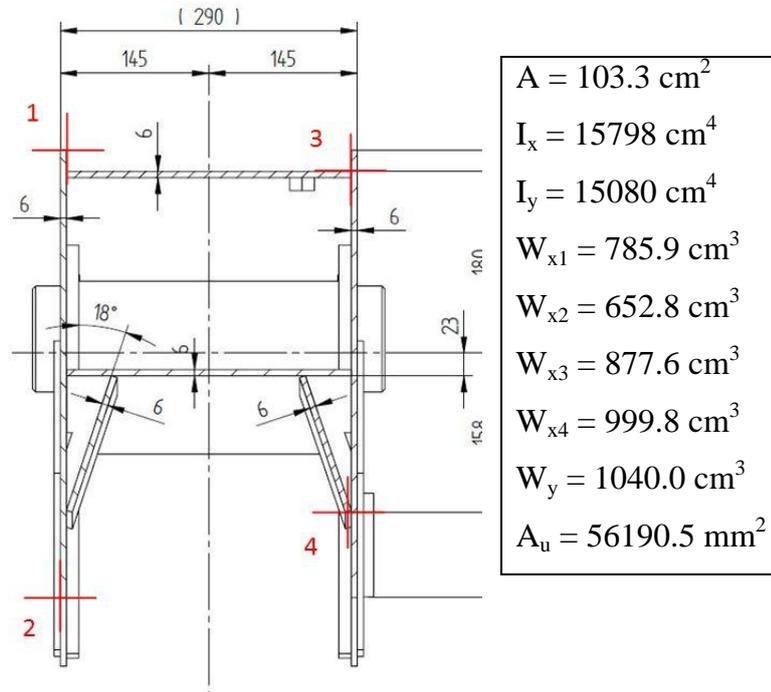
$$X_G\Big|_{\bar{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 6.84m$$

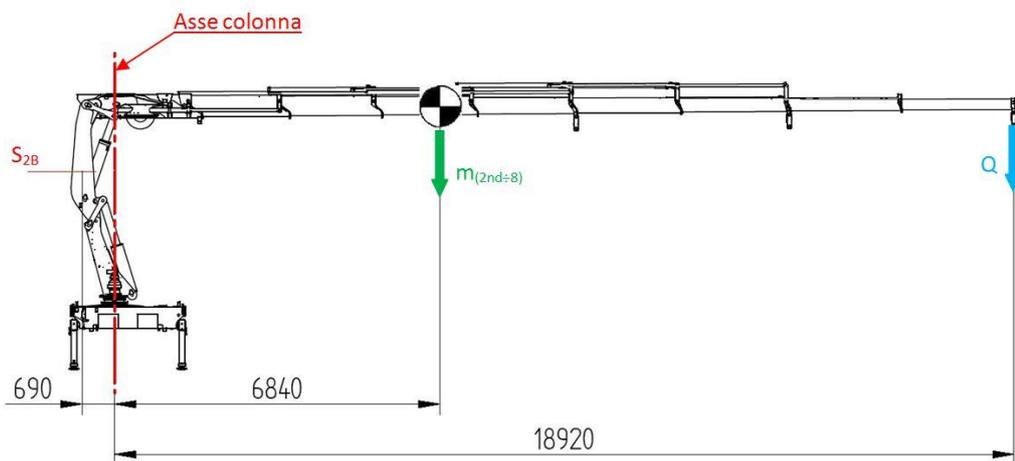
$$M_{t\max} = \bar{S}_{\max} \cdot \left(X_G\Big|_{\bar{S}\max} + d_{S_{2,A,v}} \right) = 2585 \cdot (12.18 + 0.65) \cong 33166Nm$$

$$M_{t\min} = \bar{S}_{\min} \cdot \left(X_G\Big|_{\bar{S}\min} + d_{S_{2,A,v}} \right) == 1170 \cdot (6.84 + 0.67) \cong 8763Nm$$

$$\Delta\tau_{Sd} = \tau_{\max} - \tau_{\min} = \frac{M_{t\max}}{2 \cdot s \cdot A_u} - \frac{M_{t\min}}{2 \cdot s \cdot A_u} = \frac{(33166 - 8763) \cdot 10^3}{2 \cdot 6 \cdot 71568} = 28.4 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\tau_{Sd} = 28.4 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\tau_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione B-B

Le sollecitazioni sono le stesse viste per la sezione A-A.

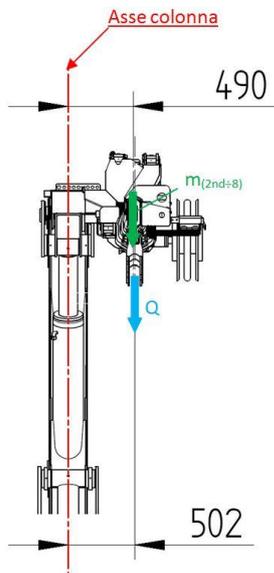
Azioni sul piano verticale

$P' \cong 21204N$

$Q' \cong 10418N$

$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,B,v}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} + d_{S_{2,B,v}}\right) =$$
$$= 21204 \cdot (6.84 + 0.69) + 10418 \cdot (18.92 + 0.69) \cong 3639631Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,B,v}}\right) = 21204 \cdot (6.84 + 0.69) = 159666 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{363963 - 159666}{652.8} = 312.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 312.9 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

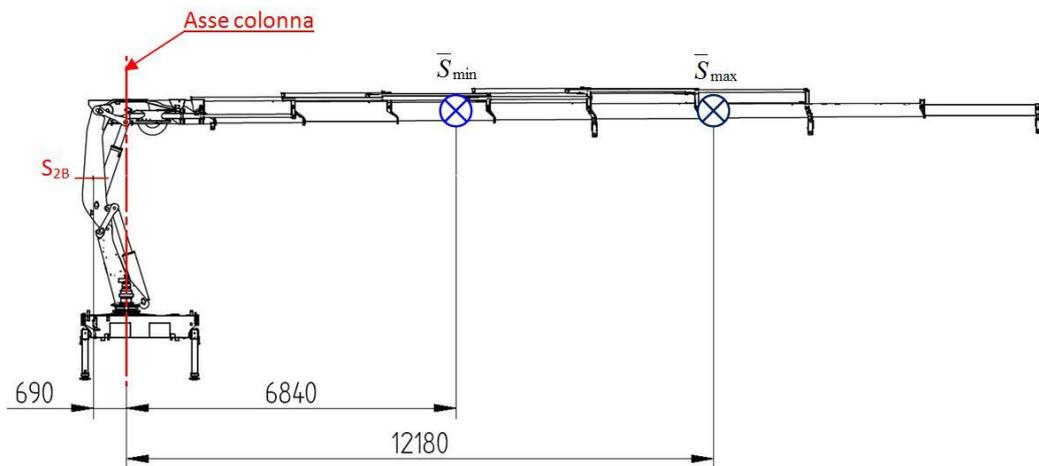
Azioni sul piano laterale

Si presentano le stesse sollecitazioni che, quando il braccio principale era sull'orizzontale, generavano la torsione dovuta all'inzancatura.

$$M_{f,L,\max} = 1415 Nm$$

$$M_{f,L,\min} = 963 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,L,\max}}{W_y} - \frac{M_{f,L,\min}}{W_y} = \frac{1415 - 963}{1040.0} = 0.43 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 0.43 \frac{N}{mm^2} \geq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni torsionali

I carichi dovuti alla rotazione dei comandi sono quelli già visti durante la verifica del braccio secondario.

$$\bar{S}_{\max} = 2582N$$

$$\bar{S}_{\min} = 1170N$$

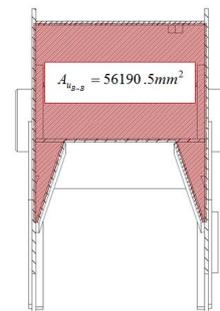
$$X_G\big|_{\bar{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \mathrm{m}_{(2^{nd} \div 6)} + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{\mathrm{m}_{(2^{nd} \div 6)} + \mathrm{Q}} = \frac{9.09 \cdot 1965 + 21.40 \cdot 900}{1965 + 900} = 12.18m$$

$$X_G\big|_{\bar{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 6.84m$$

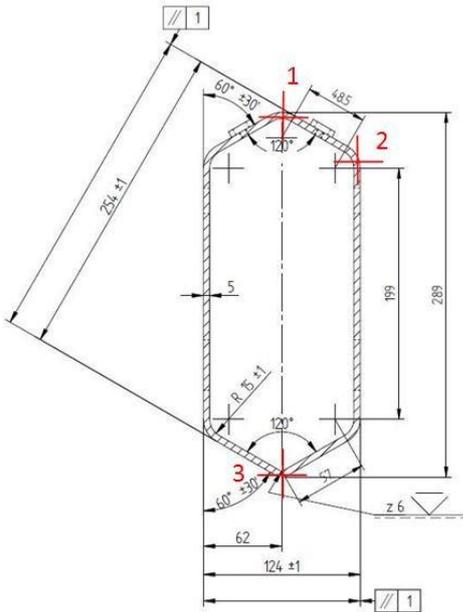
$$M_{t\max} = \bar{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\bar{S}\max} + d_{S_{2,A,v}}\right) == 2585 \cdot (12.18 + 0.69) \cong 33230Nm$$

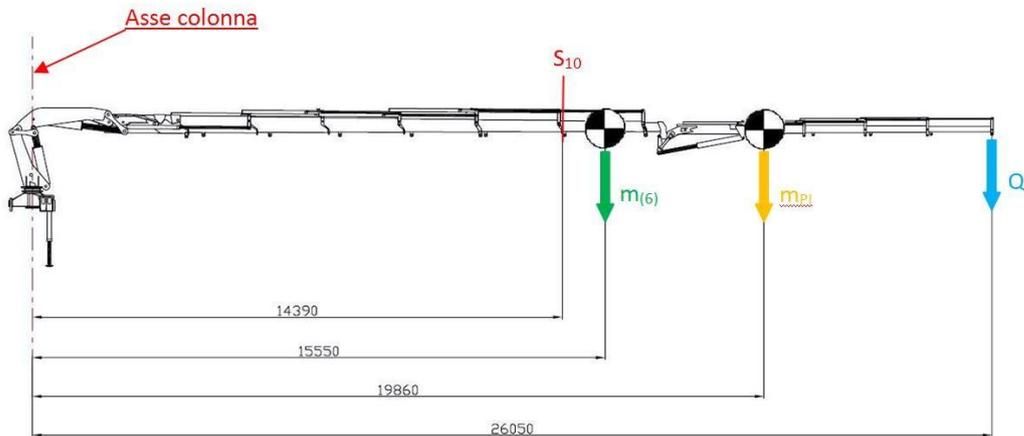
$$M_{t\min} = \bar{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\bar{S}\min} + d_{S_{2,A,v}}\right) == 1170 \cdot (6.84 + 0.69) \cong 8810Nm$$

$$\Delta\tau_{Sd} = \tau_{\max} - \tau_{\min} = \frac{M_{t\max}}{2 \cdot s \cdot A_u} - \frac{M_{t\min}}{2 \cdot s \cdot A_u} = \frac{(33230 - 8810) \cdot 10^3}{2 \cdot 6 \cdot 56190.5} = 36.2\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\tau_{Sd} = 36.2\frac{N}{mm^2} \le \Delta\tau_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Gru 400.6 + J4

Verifica della sezione S_{10}: 6° braccio sfilabile

$A = 35.0\ cm^2$
$I_x = 2998.0\ cm^4$
$I_y = 921.8\ cm^4$
$W_{x1} \cong W_{x3} = 205.3\ cm^3$
$W_{x2} = 290.2\ cm^3$
$W_y = 148.6\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$m_{(6)} = 155kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot \left(m_{(6)} + m_{PI}\right) \cdot g = 1.1 \cdot (155 + 495) \cdot 9.81 \cong 7014N$$

P’ agisce sul baricentro dei centri di massa del sesto sfilo ($m_{(6)}$) e della prolunga integrale ($m_{(PI)}$), alla distanza $d_{P'}$ dall’asse colonna.

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{(6)}} \cdot m_{(6)} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{(6)} + m_{PI}} = \frac{15.55 \cdot 155 + 19.86 \cdot 495}{155 + 495} = 18.83m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

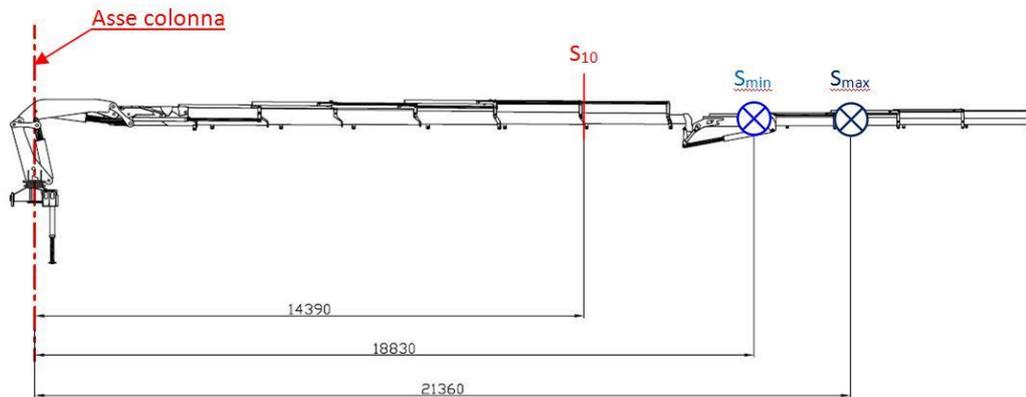
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{10}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_{10}}\right) =$$
$$= 7014 \cdot (18.83 - 14.46) + 4862 \cdot (26.05 - 14.46) \cong 87002Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{10}}\right) = 7014 \cdot (18.83 - 14.46) = 30651Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{87002 - 30651}{205.3} = 274.5\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 274.5\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,6°sfilo} = \left(m_{(6)} + m_{PI} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (155 + 495 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 918N$$

$$F_{hi,\min,6°sfilo} = \left(m_{(6)} + m_{PI}\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (155 + 495) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 557N$$

$$\overline{S}_{\max,6°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,6°sfilo} = 1.05 \cdot 918 \cong 964N$$

$$\overline{S}_{\min,6°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,6°sfilo} = 1.05 \cdot 557 \cong 585N$$

$\underline{S}_{max}$ ed $\underline{S}_{min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\bar{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \left(\mathrm{m}_{(6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{\left(\mathrm{m}_{(6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{Q}} = \frac{18.83 \cdot (155 + 495) + 26.05 \cdot 420}{155 + 495 + 420} = 21.36m$$

$$X_G\big|_{\bar{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 18.83m$$

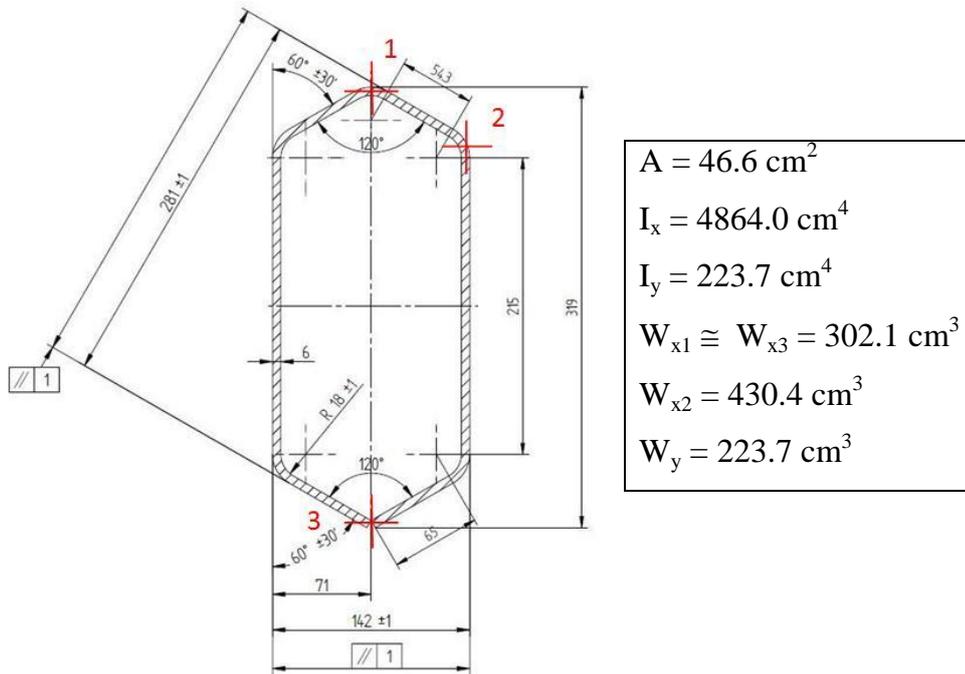
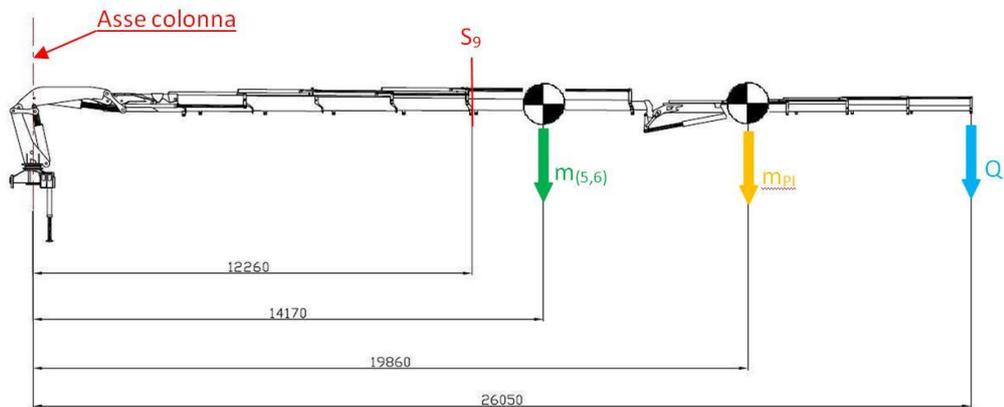
$$M_{f,o,\max} = \bar{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{10}}\right) = 964 \cdot (21.36 - 14.39) \cong 6719N$$

$$M_{f,o,\min} = \bar{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{10}}\right) = 585 \cdot (18.83 - 14.39) \cong 2597N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{6719 - 2597}{148.6} \cong 27.7\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 27.7\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_9: 5° braccio sfilabile

<u>Azioni sul piano verticale</u>

$$m_{(5,6)} = 334kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot \left(m_{(5,6)} + m_{PI}\right) \cdot g = 1.1 \cdot (334 + 495) \cdot 9.81 \cong 8935N$$

P' agisce sul baricentro dei centri di massa del quinto e sesto sfilo ($m_{(5,6)}$) e della prolunga integrale ($m_{(PI)}$), alla distanza $d_{P'}$ dall'asse colonna.

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{(5,6)}} \cdot m_{(5,6)} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{(5,6)} + m_{PI}} = \frac{14.17 \cdot 334 + 19.86 \cdot 495}{334 + 495} = 17.58m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

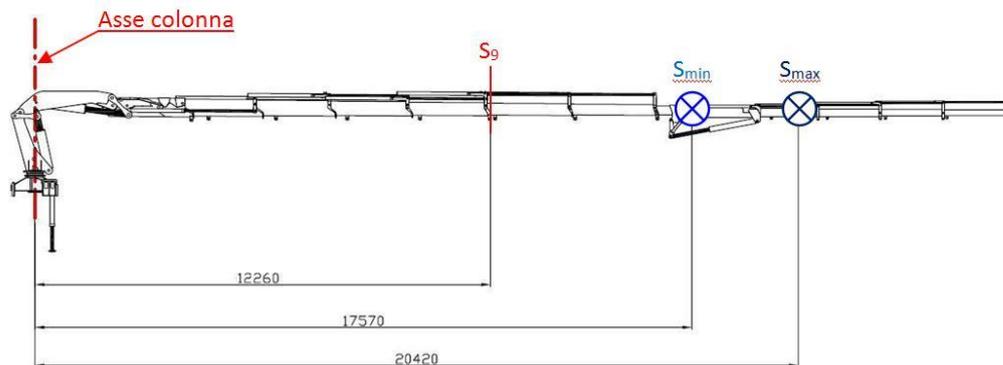
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_9}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_9}) =$$
$$= 8935 \cdot (17.57 - 12.26) + 4862 \cdot (26.05 - 12.26) \cong 114492Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_9}) = 8935 \cdot (17.57 - 12.26) \cong 47445Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{114492 - 47445}{302.1} \cong 221.9\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 221.9\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,5°sfilo} = (m_{(5,6)} + m_{PI} + Q) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (334 + 495 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1072N$$

$$F_{hi,\min,5°sfilo} = (m_{(5,6)} + m_{PI}) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (334 + 495) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 712N$$

$$\overline{S}_{\max,5°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,5°sfilo} = 1.05 \cdot 918 \cong 1126N$$

$$\overline{S}_{\min,5°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,5°sfilo} = 1.05 \cdot 712 \cong 748N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\bar{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \left(\mathrm{m}_{(5,6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{\left(\mathrm{m}_{(5,6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{Q}} = \frac{17.57 \cdot (334 + 495) + 26.05 \cdot 420}{334 + 495 + 420} = 20.42m$$

$$X_G\big|_{\bar{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 17.57m$$

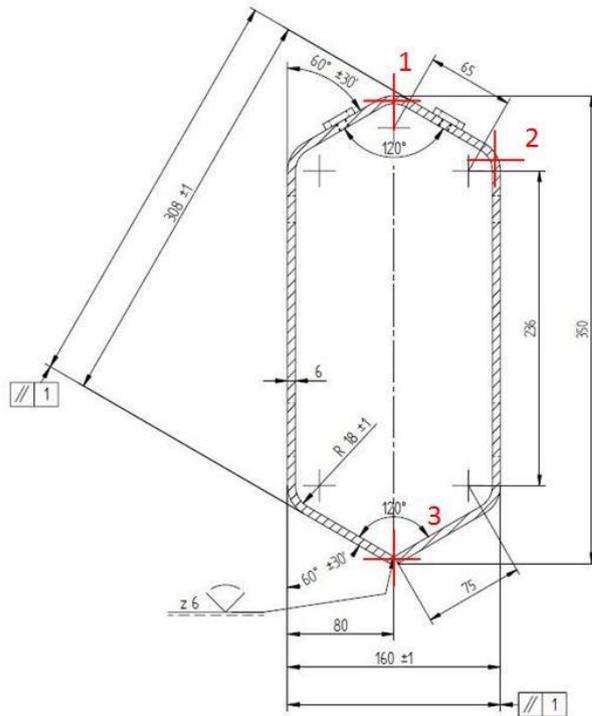
$$M_{f,o,\max} = \bar{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\bar{S}\max} - d_{S_9}\right) = 1126 \cdot (20.42 - 12.26) \cong 9188N$$

$$M_{f,o,\min} = \bar{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\bar{S}\min} - d_{S_9}\right) = 748 \cdot (17.57 - 12.26) \cong 3972N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{9188 - 3972}{223.7} \cong 23.3\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 23.3\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Verifica della sezione S_8: 4° braccio sfilabile

$A = 51.8\ cm^2$

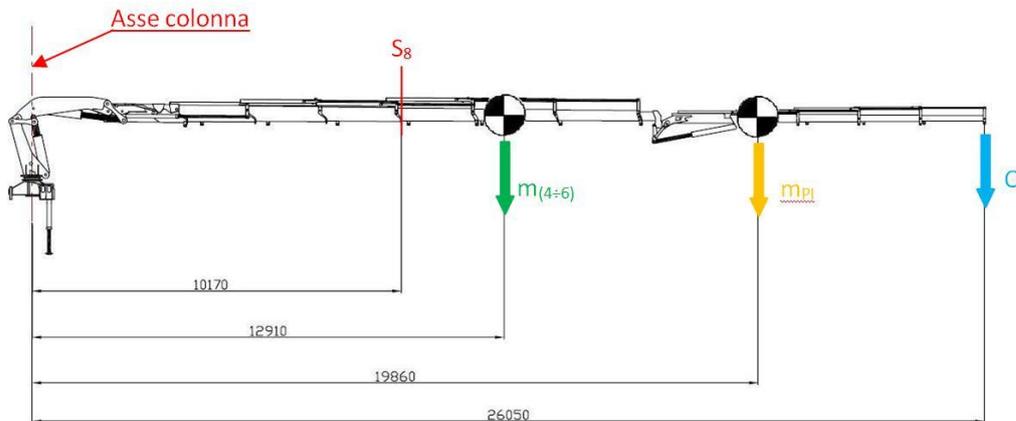
$I_x = 6639.0\ cm^4$

$I_y = 2250.0\ cm^4$

$W_{x1} \cong W_{x3} = 374.0\ cm^3$

$W_{x2} = 521.9\ cm^3$

$W_y = 281.3\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$m_{(4\div6)} = 515kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot \left(m_{(4\div6)} + m_{PI}\right) \cdot g = 1.1 \cdot (515 + 495) \cdot 9.81 \cong 10899N$$

P' agisce sul baricentro dei centri di massa del quarto, quinto e sesto sfilo ($m_{(4\div6)}$) e della prolunga integrale ($m_{(PI)}$), alla distanza $d_{P'}$ dall'asse colonna.

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{(4\div6)}} \cdot m_{(4\div6)} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{(4\div6)} + m_{PI}} = \frac{12.91 \cdot 515 + 19.86 \cdot 495}{515 + 495} = 16.32m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

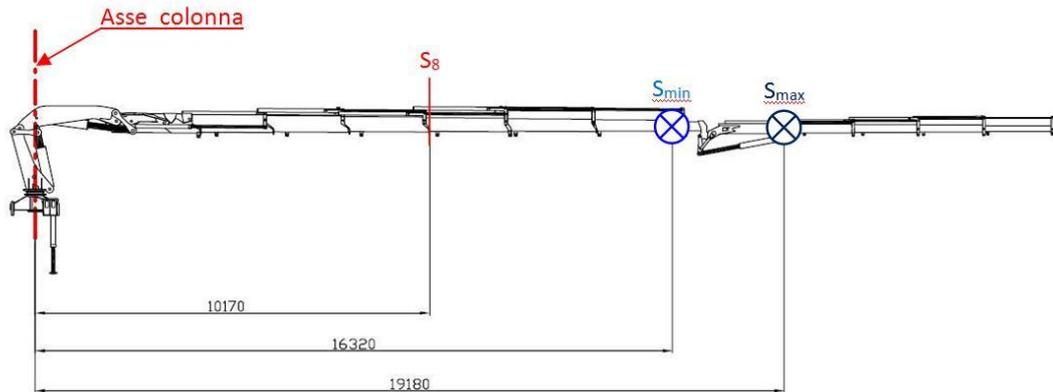
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_8}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_8}\right) =$$
$$= 10899 \cdot (16.32 - 10.17) + 4862 \cdot (26.05 - 10.17) \cong 144632Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_8}\right) = 10899 \cdot (16.32 - 10.17) \cong 67029Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{144632 - 67029}{374.0} \cong 206.4\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 206.4\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,4°sfilo} = \left(m_{(4\div6)} + m_{PI} + Q\right) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (515 + 495 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1227N$$

$$F_{hi,\min,4°sfilo} = \left(m_{(4\div6)} + m_{PI}\right) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (515 + 495) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 867N$$

$$\overline{S}_{\max,4°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,4°sfilo} = 1.05 \cdot 918 \cong 1288N$$

$$\overline{S}_{\min,4°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,4°sfilo} = 1.05 \cdot 867 \cong 910N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\Big|_{\overline{S}\max} = \frac{d_{P'} \cdot \left(m_{(4\div 6)} + m_{PI}\right) + d_{Q'} \cdot Q}{\left(m_{(4\div 6)} + m_{PI}\right) + Q} = \frac{16.32 \cdot (515 + 495) + 26.05 \cdot 420}{515 + 495 + 420} = 19.18m$$

$$X_G\Big|_{\overline{S}\min} = d_{P'} = 16.32m$$

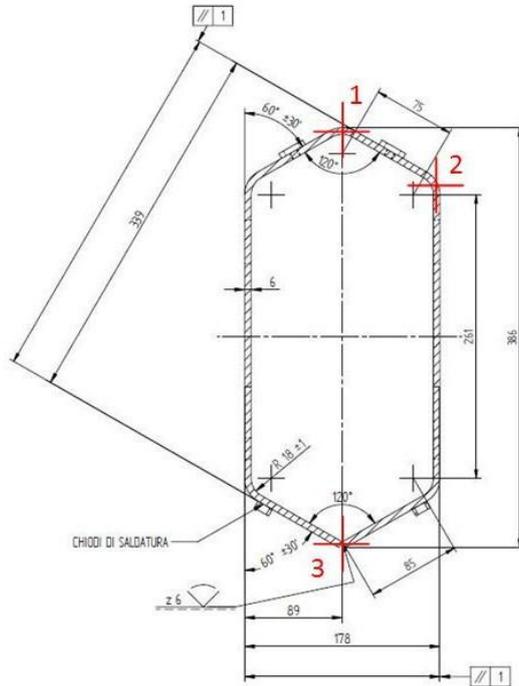
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\Big|_{\underline{S}\max} - d_{S_8}\right) = 1288 \cdot (19.18 - 10.17) \cong 11605N$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\Big|_{\underline{S}\min} - d_{S_8}\right) = 910 \cdot (16.32 - 10.17) \cong 5597N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{11605 - 5597}{281.3} \cong 21.4\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 21.4\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_7: 3° braccio sfilabile

$A = 57.1\ cm^2$

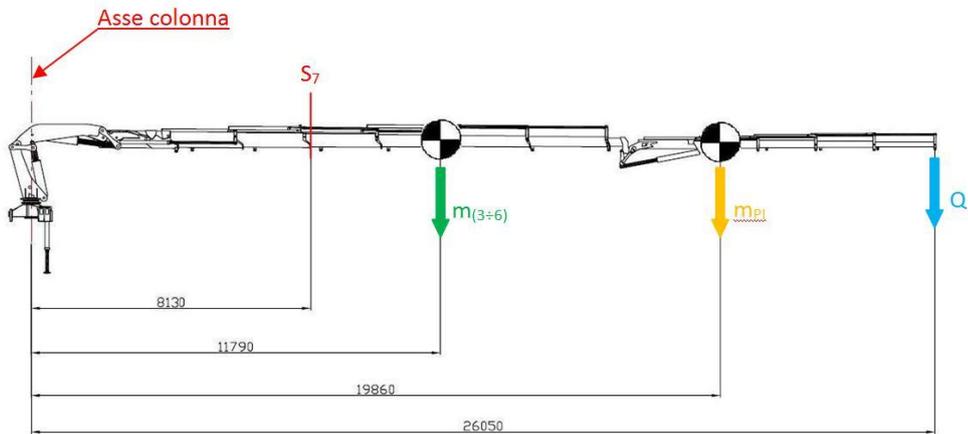
$I_x = 8800.0\ cm^4$

$I_y = 3074.0\ cm^4$

$W_{x1} \cong W_{x3} = 453.1\ cm^3$

$W_{x2} = 621.9\ cm^3$

$W_y = 345.4\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$m_{(3\div6)} = 702kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot \left(m_{(3\div6)} + m_{PI}\right) \cdot g = 1.1 \cdot (702 + 495) \cdot 9.81 \cong 12917N$$

P’ agisce sul baricentro dei centri di massa del terzo, quarto, quinto e sesto sfilo ($m_{(3\div6)}$) e della prolunga integrale ($m_{(PI)}$), alla distanza $d_{P'}$ dall’asse colonna.

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{(3\div6)}} \cdot m_{(3\div6)} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{(3\div6)} + m_{PI}} = \frac{11.79 \cdot 702 + 19.86 \cdot 495}{702 + 495} = 15.13m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

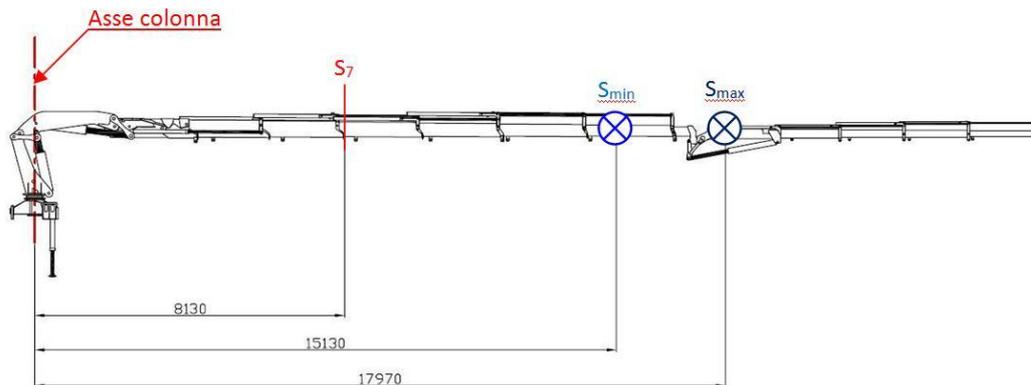
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_7}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_7}\right) =$$
$$= 12917 \cdot (15.13 - 8.13) + 4862 \cdot (26.05 - 8.13) \cong 177546Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_7}\right) = 12917 \cdot (16.32 - 8.13) \cong 90419Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{177546 - 90419}{453.1} \cong 192.3\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 192.3\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,3°sfilo} = \left(m_{(3\div6)} + m_{PI} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (702 + 495 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1388N$$

$$F_{hi,\min,3°sfilo} = \left(m_{(3\div6)} + m_{PI}\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (702 + 495) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1027N$$

$$\overline{S}_{\max,3°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,3°sfilo} = 1.05 \cdot 1388 \cong 1457N$$

$$\overline{S}_{\min,3°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,3°sfilo} = 1.05 \cdot 1027 \cong 1078N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\bar{S}\max} = \frac{d_{P'} \cdot \left(m_{(3\div6)} + m_{PI}\right) + d_{Q'} \cdot Q}{\left(m_{(3\div6)} + m_{PI}\right) + Q} = \frac{15.13 \cdot (702 + 495) + 26.05 \cdot 420}{702 + 495 + 420} = 17.97m$$

$$X_G\big|_{\bar{S}\min} = d_{P'} = 15.13m$$

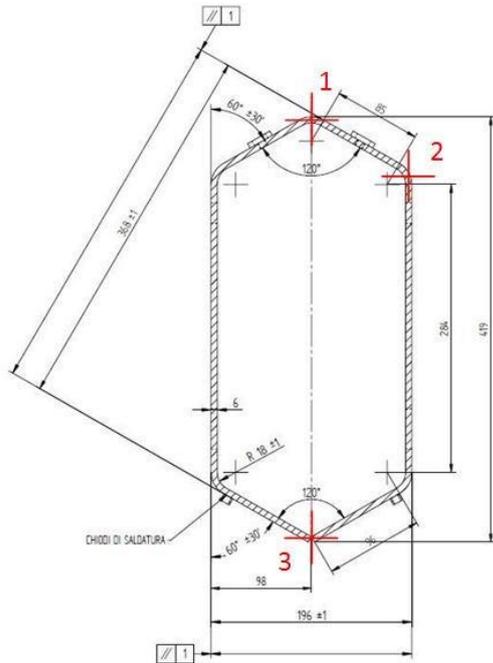
$$M_{f,o,\max} = \bar{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_7}\right) = 1457 \cdot (17.97 - 8.13) \cong 14337N$$

$$M_{f,o,\min} = \bar{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_7}\right) = 1078 \cdot (15.13 - 8.13) \cong 7546N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{14337 - 7546}{354.4} \cong 19.7\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 19.7\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Verifica della sezione S_6: 2° braccio sfilabile

$A = 62.5\ cm^2$

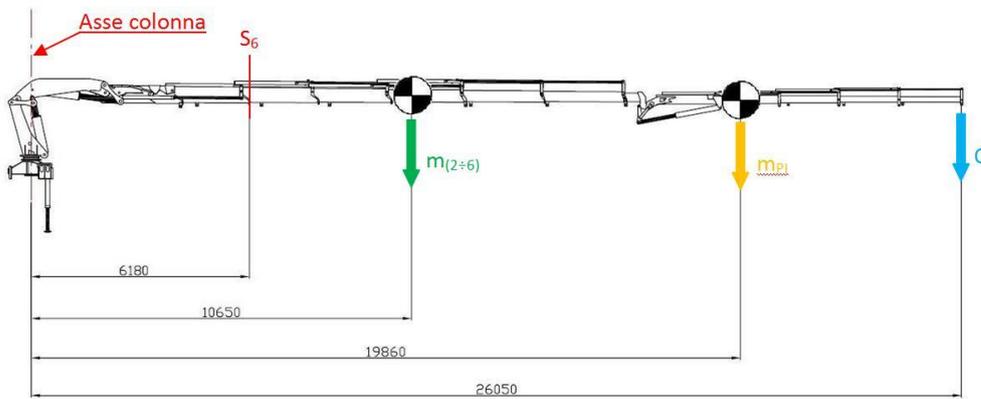
$I_x = 14455.0\ cm^4$

$I_y = 4077.0\ cm^4$

$W_{x1} \cong W_{x3} = 542.9\ cm^3$

$W_{x2} = 752.8\ cm^3$

$W_y = 416.0\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$m_{(2\div6)} = 896kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot \left(m_{(2\div6)} + m_{PI}\right) \cdot g = 1.1 \cdot (896 + 495) \cdot 9.81 \cong 15010N$$

P’ agisce sul baricentro dei centri di massa del secondo, terzo, quarto, quinto e sesto sfilo ($m_{(2\div6)}$) e della prolunga integrale ($m_{(PI)}$), alla distanza $d_{P'}$ dall’asse colonna.

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{(2\div6)}} \cdot m_{(2\div6)} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{(2\div6)} + m_{PI}} = \frac{10.65 \cdot 896 + 19.86 \cdot 495}{896 + 495} = 13.93m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

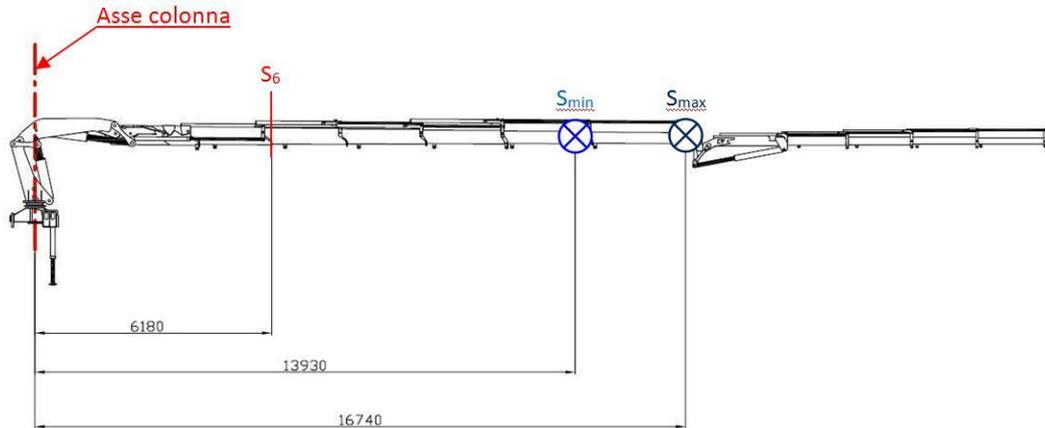
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_6}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_6}\right) =$$
$$= 15010 \cdot (13.93 - 6.18) + 4862 \cdot (26.05 - 6.18) \cong 212935Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_6}\right) = 15010 \cdot (13.93 - 6.18) \cong 116328Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{212935 - 116328}{542.9} \cong 177.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 177.9 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,2°sfilo} = \left(m_{(2\div6)} + m_{PI} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (896 + 495 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1554N$$

$$F_{hi,\min,2°sfilo} = \left(m_{(2\div6)} + m_{PI}\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (896 + 495) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1194N$$

$$\overline{S}_{\max,2°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,2°sfilo} = 1.05 \cdot 1554 \cong 1632N$$

$$\overline{S}_{\min,2°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,2°sfilo} = 1.05 \cdot 1194 \cong 1254N$$

$\underline{S}$ $_{max}$ ed $\underline{S}$ $_{min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{P'} \cdot \left(\mathrm{m}_{(2\div6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{d}_{Q'} \cdot \mathrm{Q}}{\left(\mathrm{m}_{(2\div6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{Q}} = \frac{13.93 \cdot (896 + 495) + 26.05 \cdot 420}{896 + 495 + 420} = 16.74m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 13.93m$$

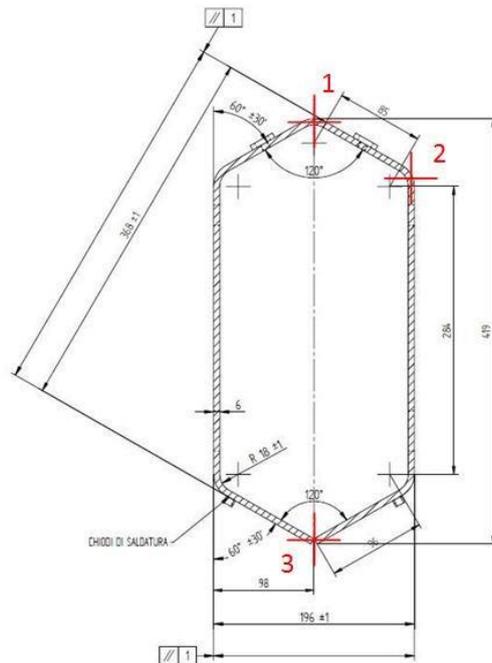
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_6}\right) = 1632 \cdot (16.74 - 6.18) \cong 17234N$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_6}\right) = 1254 \cdot (13.95 - 6.18) \cong 9744N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{17234 - 9744}{416.0 \cdot 10^6} \cong 18.0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 18.0 \frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_5: 1° braccio sfilabile

$A = 79.0\ cm^2$

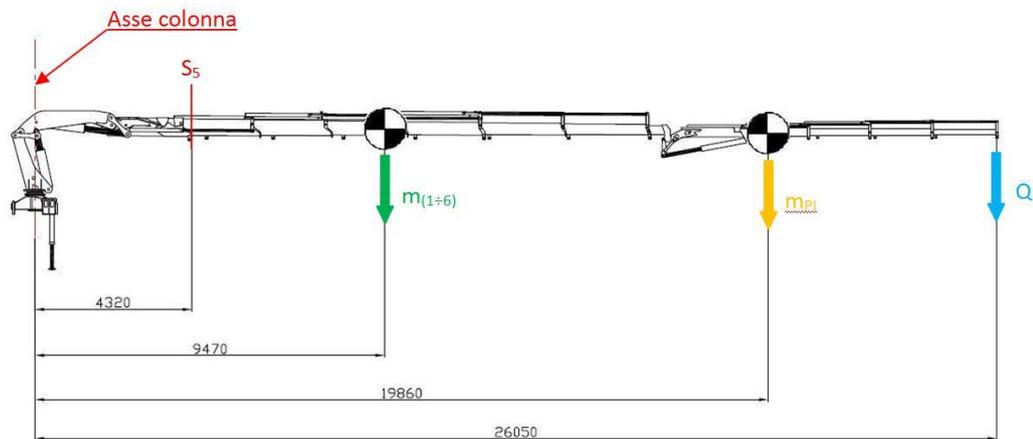
$I_x = 16905.0\ cm^4$

$I_y = 6216.0\ cm^4$

$W_{x1} \cong W_{x3} = 739.5\ cm^3$

$W_{x2} = 1072.0\ cm^3$

$W_y = 575.5\ cm^3$

<u>Azioni sul piano verticale</u>

$$m_{(1 \div 6)} = 1094 kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot (m_{(1\div6)} + m_{PI}) \cdot g = 1.1 \cdot (1094 + 495) \cdot 9.81 \cong 17417 N$$

P' agisce sul baricentro dei centri di massa del pacco sfili ($m_{(1\div6)}$) e della prolunga integrale ($m_{(PI)}$), alla distanza $d_{P'}$ dall'asse colonna.

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{(1\div6)}} \cdot m_{(1\div6)} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{(1\div6)} + m_{PI}} = \frac{9.47 \cdot 1094 + 19.86 \cdot 495}{1094 + 495} = 12.71 m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

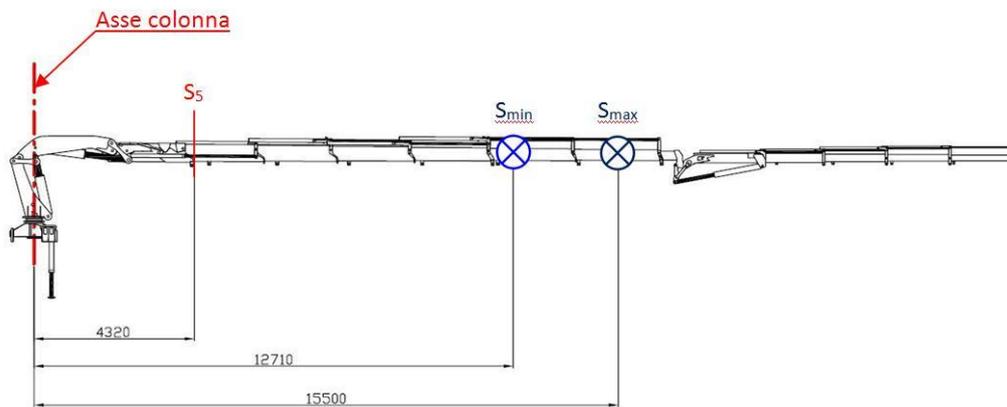
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_5}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_5}) =$$
$$= 17147 \cdot (12.71 - 4.32) + 4862 \cdot (26.05 - 4.32) \cong 249515Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_5}) = 17147 \cdot (12.71 - 4.32) \cong 143863Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{249515 - 143863}{739.3} \cong 142.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 142.9 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,1°sfilo} = (m_{(1\div6)} + m_{PI} + Q) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (1094 + 495 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1724N$$

$$F_{hi,\min,1°sfilo} = (m_{(1\div6)} + m_{PI}) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (1094 + 495) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1364N$$

$$\overline{S}_{\max,1°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,1°sfilo} = 1.05 \cdot 1724 \cong 1810N$$

$$\overline{S}_{\min,1°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,1°sfilo} = 1.05 \cdot 1364 \cong 1432N$$

$\underline{S}_{\max}$ ed $\underline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\Big|_{\overline{S}\max} = \frac{d_{P'} \cdot (m_{(1\div6)} + m_{PI}) + d_{Q'} \cdot Q}{(m_{(1\div6)} + m_{PI}) + Q} = \frac{12.71 \cdot (1096 + 495) + 26.05 \cdot 420}{1096 + 495 + 420} = 15.50m$$

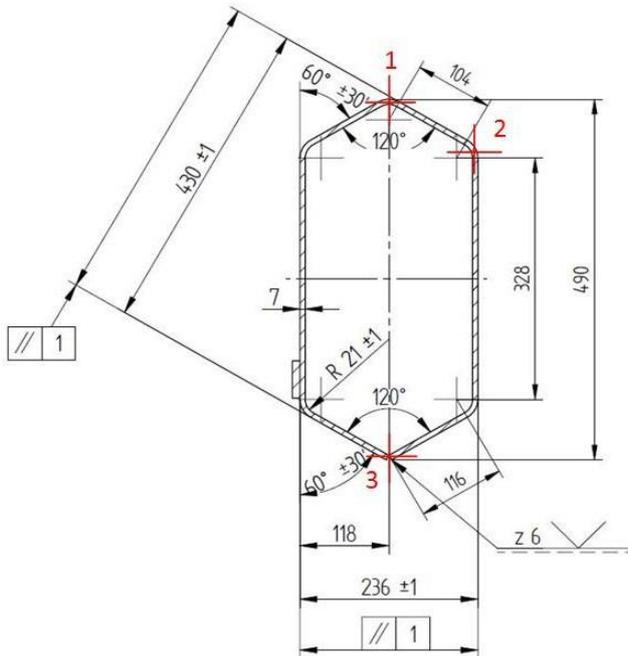
$$X_G\big|_{\bar{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 12.71m$$

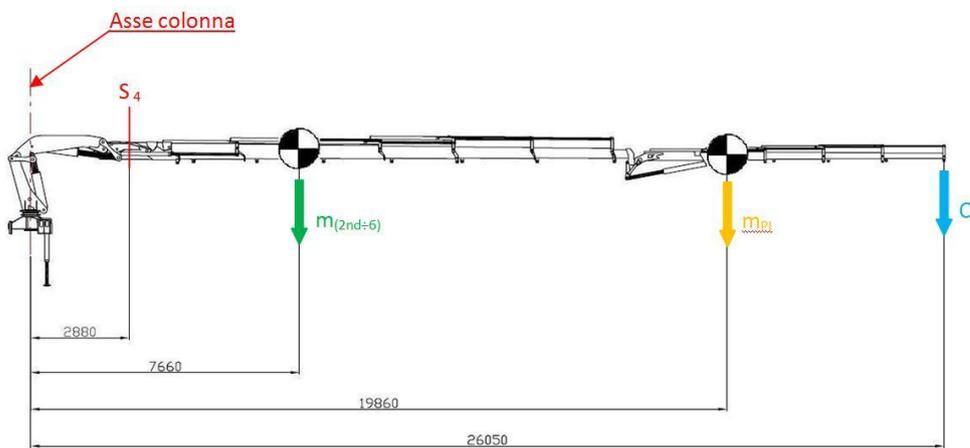
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_5} \right) = 1810 \cdot (15.50 - 4.32) \cong 20236N$$
$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_5} \right) = 1432 \cdot (12.71 - 4.32) \cong 12014N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{20236 - 12014}{575.5} \cong 14.3\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 14.3\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_4: braccio secondario

A = 85.6 cm^2
I_x = 21377.0 cm^4
I_y = 8050.0 cm^4
$W_{x1} \cong W_{x3}$ = 867.2 cm^3
W_{x2} = 1195.0 cm^3
W_y = 682.2 cm^3

Azioni sul piano verticale

$$m_{(2^{nd} \div 6)} = 1674 kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot \left(m_{(2^{nd} \div 6)} + m_{PI}\right) \cdot g = 1.1 \cdot (1674 + 495) \cdot 9.81 \cong 23406 N$$

P' agisce sul baricentro dei centri di massa del pacco sfili ($m_{(2nd \div 6)}$) e della prolunga integrale ($m_{(PI)}$), alla distanza $d_{P'}$ dall'asse colonna.

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{\left(2^{nd} \div 6\right)}} \cdot m_{(1\div 6)} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{\left(2^{nd} \div 6\right)} + m_{PI}} = \frac{7.66 \cdot 1674 + 19.86 \cdot 495}{1674 + 495} = 10.44m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

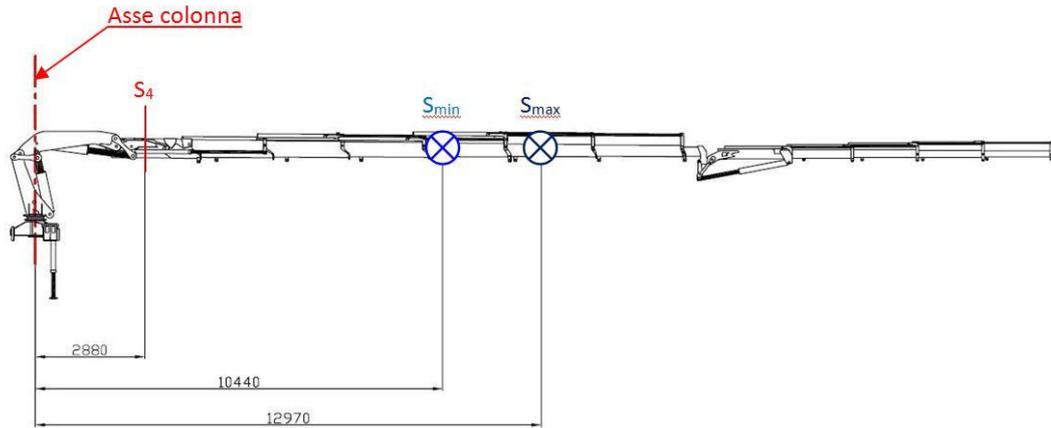
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_4}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_4}\right) =$$
$$= 23403 \cdot (10.44 - 2.88) + 4862 \cdot (26.05 - 2.88) \cong 289579Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_4}\right) = 23403 \cdot (10.44 - 2.88) \cong 176927Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_3}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_3}} = \frac{289579 - 176927}{867.2} \cong 129.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 129.9 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,braccio_2^{nd}} = \left(m_{\left(2^{nd} \div 6\right)} + m_{PI} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (1674 + 495 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 2222N$$

$$F_{hi,\min,braccio_2^{nd}} = \left(m_{\left(2^{nd} \div 6\right)} + m_{PI}\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = (1674 + 495) \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 1862N$$

$$\overline{S}_{\max,braccio_2^{nd}} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,braccio_2^{nd}} = 1.05 \cdot 2222 \cong 2333N$$

$$\overline{S}_{\min,braccio_2^{nd}} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,braccio_2^{nd}} = 1.05 \cdot 1862 \cong 1955N$$

$\underline{S}_{max}$ ed $\underline{S}_{min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\bar{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}}\cdot\left(\mathrm{m}_{(2^{nd}\div 6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{d_{Q'}}\cdot \mathrm{Q}}{\left(\mathrm{m}_{(2^{nd}\div 6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{Q}} = \frac{10.44\cdot(1674+495)+26.05\cdot 420}{1674+495+420} = 12.97m$$

$$X_G\big|_{\bar{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 10.44m$$

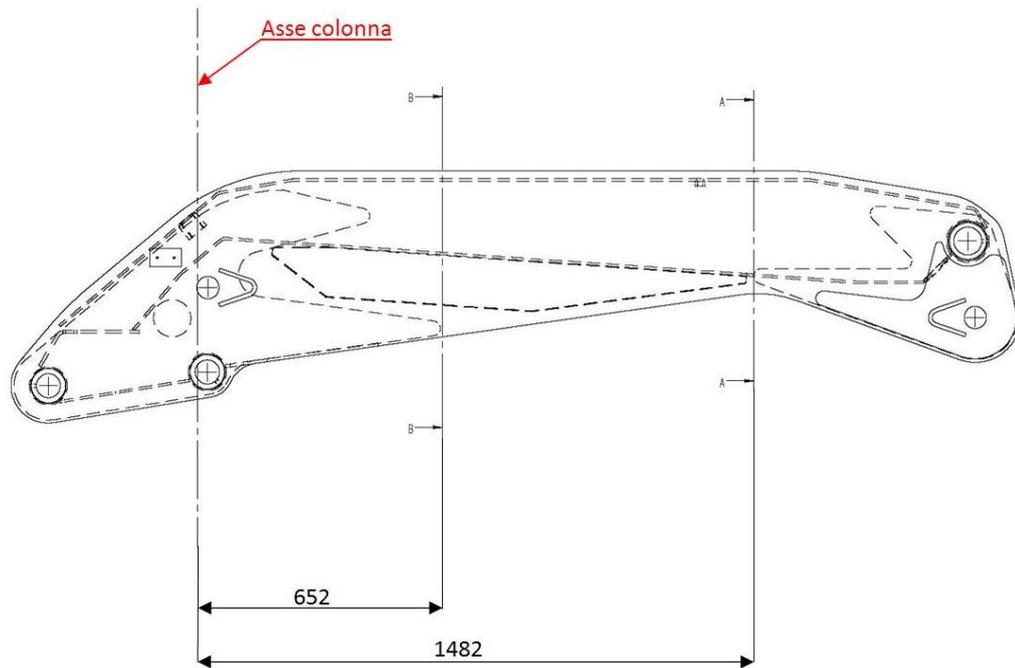
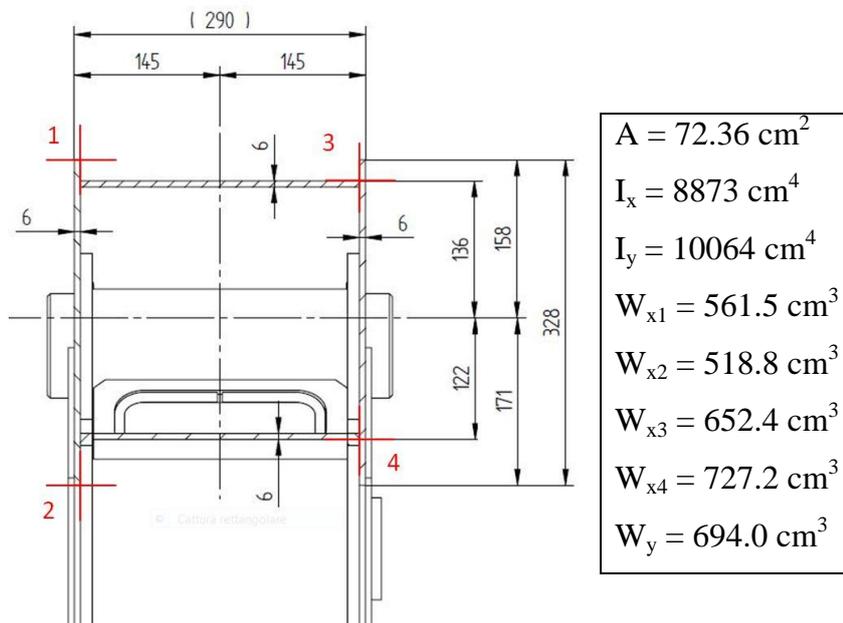
$$M_{f,o,\max} = \bar{S}_{\max}\cdot\left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_4}\right) = 2333\cdot(1297-2.88) \cong 23540N$$

$$M_{f,o,\min} = \bar{S}_{\min}\cdot\left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_4}\right) = 1955\cdot(10.44-2.88) \cong 14780N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{23540-14780}{682.2} \cong 12.8\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 12.8\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

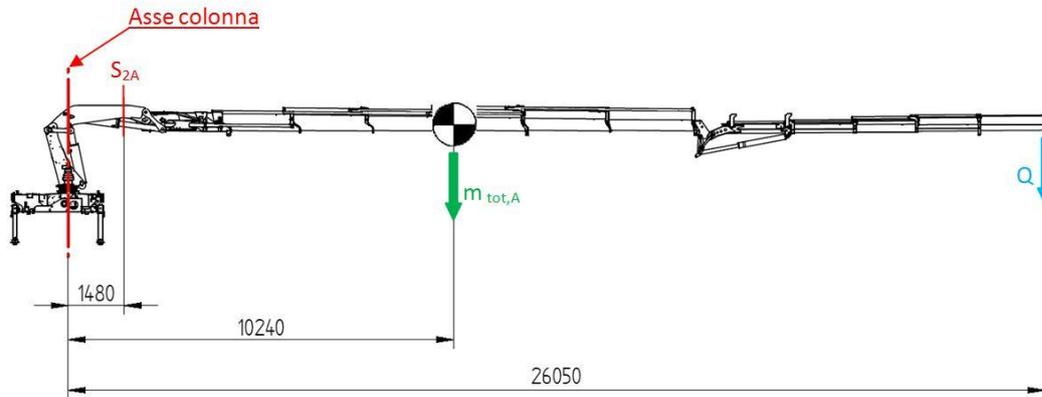
Verificata

Verifica della sezione S_2: braccio principale

Verifica della sezione A-A

Valgono le stesse considerazioni effettuate per la verifica della gru base _400.8, sia per le masse sia per le distanze dei baricentri dall'asse colonna.

Si ottiene:

$$m_{1^{st}(braccio+martinetto)} = 522kg$$

$$m_{utile-A} = \frac{1}{3} m_{1^{st}(braccio+martinetto)} = 174kg$$

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot (m_{tot,A} + m_{PI}) \cdot g = 1.1 \cdot (1674 + 174 + 495) \cdot 9.81 \cong 25283N$$

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{tot,A}} \cdot m_{tot,A} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{(2^{nd} \div 6)} + m_{PI}} = \frac{7.66 \cdot (1674 + 174) + 19.86 \cdot 495}{1674 + 174 + 495} \cong 10.24m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

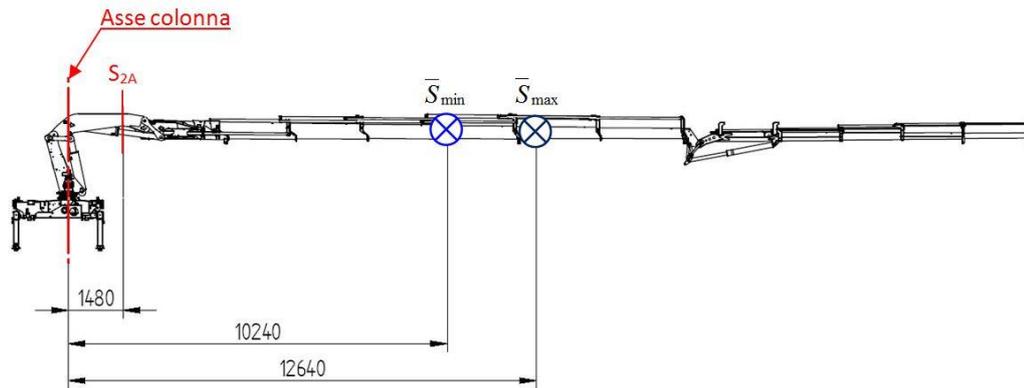
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{2A}}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_{2A}}) =$$
$$= 25283 \cdot (10.24 - 1.48) + 4862 \cdot (26.05 - 1.48) \cong 340938Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{2A}}) = 25283 \cdot (10.24 - 1.48) = 221479Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{340938 - 221479}{518.8} = 230.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 230.3 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,1^{st}A} = \left(m_{tot_A} + m_{PI} + Q\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(1674 + 174 + 495 + 420\right) \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 2371N$$

$$F_{hi,\min,1^{st}A} = \left(m_{tot_A} + m_{PI}\right) \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(1674 + 174 + 495\right) \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 2011N$$

$$\overline{S}_{\max,1^{st}A} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,1^{st}A} = 1.05 \cdot 2371 \cong 2490N$$

$$\overline{S}_{\min,1^{st}A} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,1^{st}A} = 1.05 \cdot 2011 \cong 2112N$$

$\underline{S}_{max}$ ed $\underline{S}_{min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d_{P'}} \cdot \left(\mathrm{m}_{tot_A} + m_{PI}\right) + \mathrm{d_{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{\left(\mathrm{m}_{tot_A} + m_{PI} + \mathrm{Q}\right)} = \frac{10.24 \cdot \left(1674 + 174 + 495\right) + 26.05 \cdot 420}{1674 + 174 + 495 + 420} = 12.64m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d_{P'}} = 10.24m$$

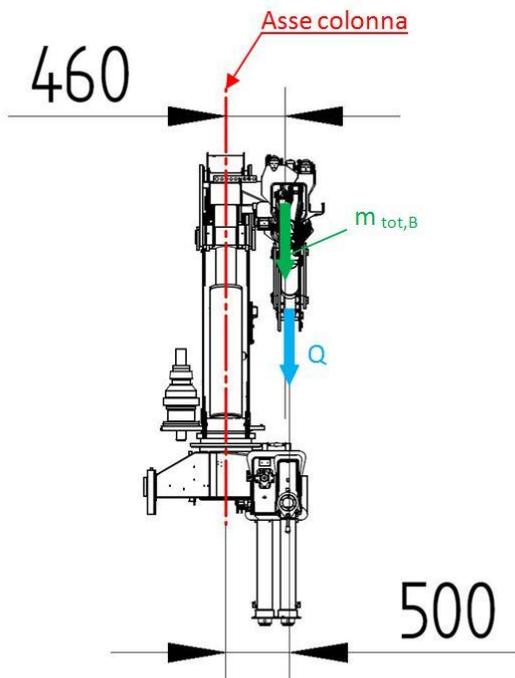
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{2A}}\right) = 2490 \cdot \left(12.64 - 1.48\right) \cong 27788N$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{2A}}\right) = 2011 \cdot \left(10.24 - 1.48\right) \cong 18501N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{27788 - 18501}{694.0} \cong 13.4\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 13.4\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni torsionali

$$M_{t,\max} = \left(m_{pacco_bracci} + m_{PI}\right)\cdot b_{m_{pb}} + Q\cdot b_Q = \left(1674 + 495\right)\cdot 0.46 + 420\cdot 0.50 \cong 1415 Nm$$

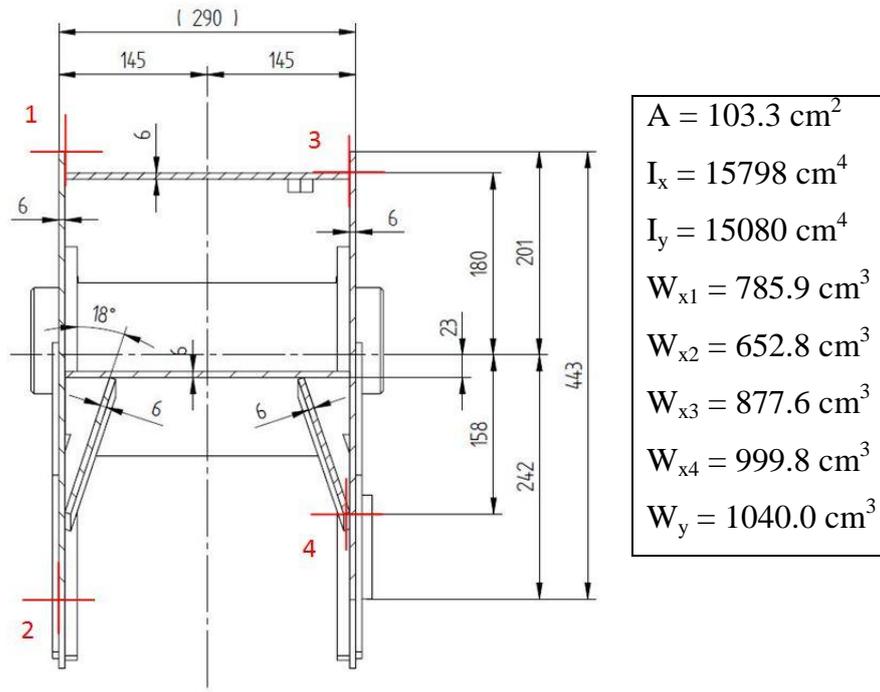
$$M_{t,\min} = m_{pacco_bracci}\cdot b_{m_{pb}} = \left(1674 + 795\right)\cdot 0.50 \cong 998 Nm$$

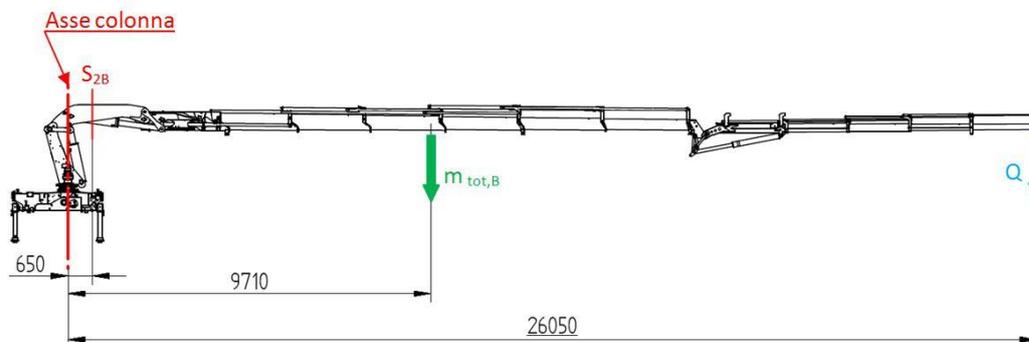
Data la natura della sezione, a parete sottile, per la determinazione di $\Delta\tau_{max}$ e $\Delta\tau_{min}$ si utilizza la teoria di Bredt, trascurando le appendici si sezione, come ipotesi a favore di sicurezza.

$$\Delta\tau_{Sd} = \tau_{max} - \tau_{min} = \frac{M_{t,max}}{2 \cdot s \cdot A_u} - \frac{M_{t,min}}{2 \cdot s \cdot A_u} = \frac{(1208 - 998) \cdot 10^3}{2 \cdot 6 \cdot 71568} = 0.24 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\tau_{Sd} = 0.24 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\tau_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Verifica della sezione B-B

Si applicano le stesse considerazioni effettuate per le configurazioni ed allestimenti verificati precedentemente.

Azioni sul piano verticale

$$m_{1^{st}(braccio+martinetto)} = 522kg$$

$$m_{utile-A} = \frac{2}{3} m_{1^{st}(braccio+martinetto)} = 348kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot m_{tot,B} \cdot g = 1.1 \cdot (1674 + 348 + 495) \cdot 9.81 \cong 27161N$$

$$d_{P'} = \frac{d_{m_{tot,B}} \cdot m_{tot,B} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{tot,B} + m_{PI}} = \frac{7.66 \cdot (1674 + 348) + 19.86 \cdot 495}{1674 + 348 + 495} \cong 9.71m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

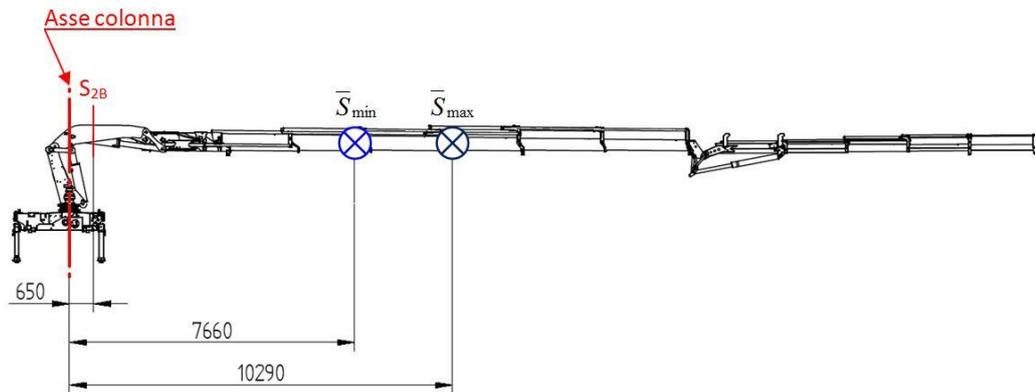
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{2B}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_{2B}}\right) =$$
$$= 27161 \cdot (9.71 - 0.65) + 4862 \cdot (26.05 - 0.65) \cong 369573Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{2B}}\right) = 27161 \cdot (9.71 - 0.65) = 246079Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{369573 - 246079}{652.8} = 189.2\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 189.2\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

<u>Azioni sul piano orizzontale</u>

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,1^{st}B} = \left(m_{tot_B} + Q\right) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (1674 + 348 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 2096N$$

$$F_{hi,\min,1^{st}B} = m_{totB} \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (1674 + 348) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 1735N$$

$$\overline{S}_{\max,1^{st}B} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,1^{st}B} = 1.05 \cdot 2096 \cong 2201N$$

$$\overline{S}_{\min,1^{st}B} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,1^{st}B} = 1.05 \cdot 1735 \cong 1822N$$

$\underline{S}_{max}$ ed $\underline{S}_{min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{d_{P'} \cdot \left(m_{tot_B} + m_{PI}\right) + d_{Q'} \cdot Q}{m_{tot_B} + m_{PI} + Q} = \frac{7.66 \cdot (1674 + 348 + 420) + 26.05 \cdot 420}{1674 + 348 + 420} = 10.29m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = d_{P'} = 7.66m$$

$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{2B}}\right) = 2201 \cdot (10.29 - 0.65) \cong 21218N$$

$$M_{f,o,\min} = \bar{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{2B}}\right) = 1822 \cdot (7.66 - 0.65) \cong 12772N$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{21218 - 12772}{1040.0} \cong 8.1\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 8.1\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

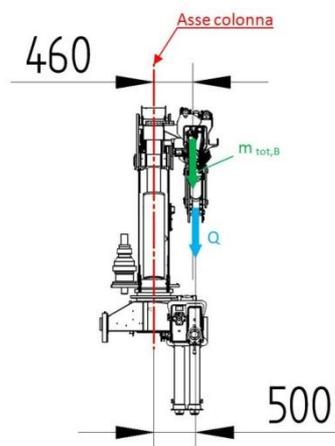
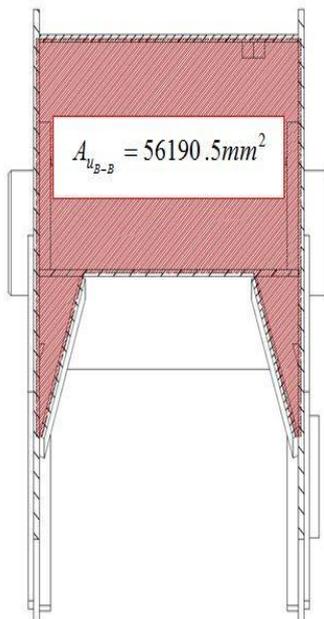
Verificata

Azioni torsionali

I momenti torcenti sono gli stessi visti per la sezione A-A:

$M_{t,\max} \cong 1208Nm$

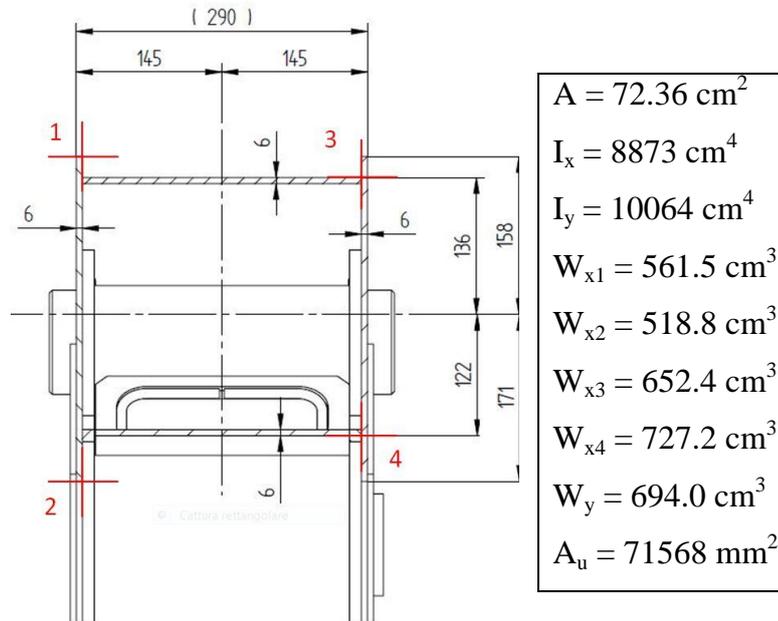
$M_{t,\min} \cong 998Nm$

La verifica si esegue allo stesso modo.

$$\Delta\tau_{Sd} = \tau_{\max} - \tau_{\min} = \frac{M_{t,\max}}{2 \cdot s \cdot A_u} - \frac{M_{t,\min}}{2 \cdot s \cdot A_u} = \frac{(1208 - 998) \cdot 10^3}{2 \cdot 6 \cdot 56190.5} = 0.31\frac{N}{mm^2}$$

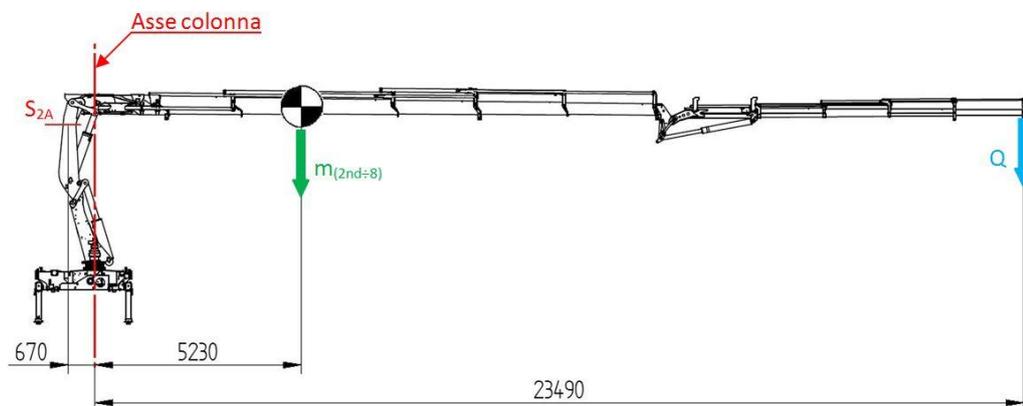
$$\Delta\tau_{Sd} = 0.31\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\tau_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Braccio principale verticale e pacco bracci orizzontale

Verifica della sezione A-A

In questa configurazione le sollecitazioni sono ancora:

- Momento flettente dovuto alle masse ed ai carichi;
- Momento flettente generato dall'inzancatura;
- Momento torcente dovuto all'azione di rotazione dei comandi.

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot \left(m_{(2^{nd} \div 6)} + m_{PI}\right) \cdot g = 1.1 \cdot (1674 + 495) \cdot 9.81 \cong 23406 N$$

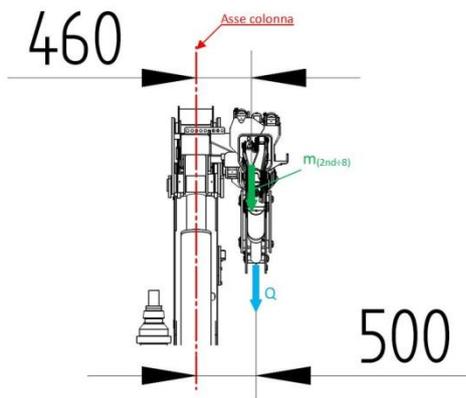
$$d_{P'} = \frac{d_{m_{(2nd \div 6)}} \cdot m_{(2^{nd} \div 6)} + d_{PI} \cdot m_{PI}}{m_{(2^{nd} \div 6)} + m_{PI}} = \frac{5.23 \cdot 1674 + 19.48 \cdot 495}{1674 + 495} \cong 8.48m$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,A,v}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} + d_{S_{2,A,v}}\right) =$$
$$= 23406 \cdot (5.23 + 0.67) + 4862 \cdot (23.49 + 0.67) \cong 255561Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,A,v}}\right) = 23406 \cdot (5.23 + 0.67) = 138095Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{255561 - 138095}{518.8} = 226.4\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 226.4\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

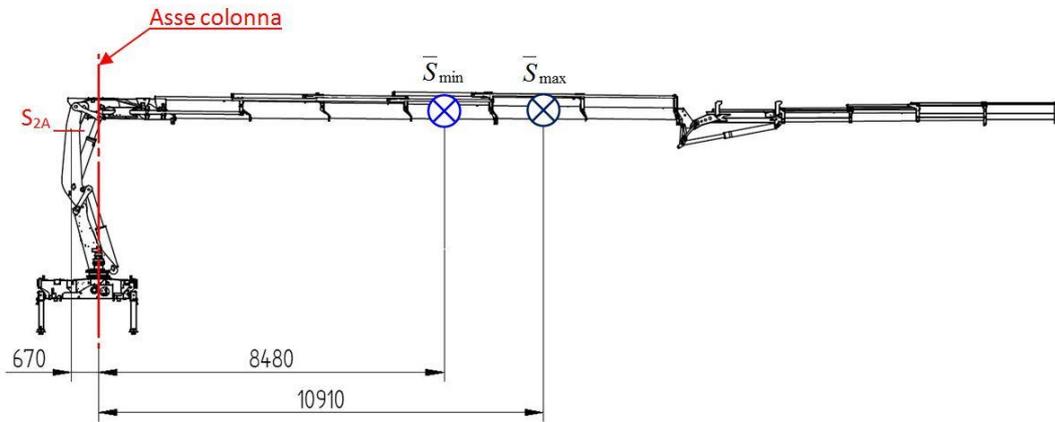
Azioni sul piano laterale

Si presentano le stesse sollecitazioni che, quando il braccio principale era sull'orizzontale, generavano la torsione dovute all'inzancatura.

$$M_{f,L,\max} = 1208Nm$$

$$M_{f,L,\min} = 998Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,L,\max}}{W_y} - \frac{M_{f,L,\min}}{W_y} = \frac{1208 - 998}{694.0} = 0.3\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 0.3\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni torsionali

I carichi dovuti alla rotazione dei comandi sono quelli già visti durante la verifica del braccio secondario.

$$\overline{S}_{max} = 2333N$$

$$\overline{S}_{min} = 1955N$$

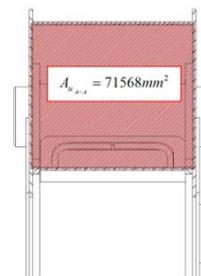
$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{P'}\cdot\left(\mathrm{m}_{(2^{nd}\div 6)} + m_{PI}\right) + \mathrm{d}_{Q'}\cdot \mathrm{Q}}{\mathrm{m}_{(2^{nd}\div 6)} + m_{PI} + \mathrm{Q}} = \frac{8.48\cdot(1674+495)+23.49\cdot 420}{1674+495+420} = 10.91m$$

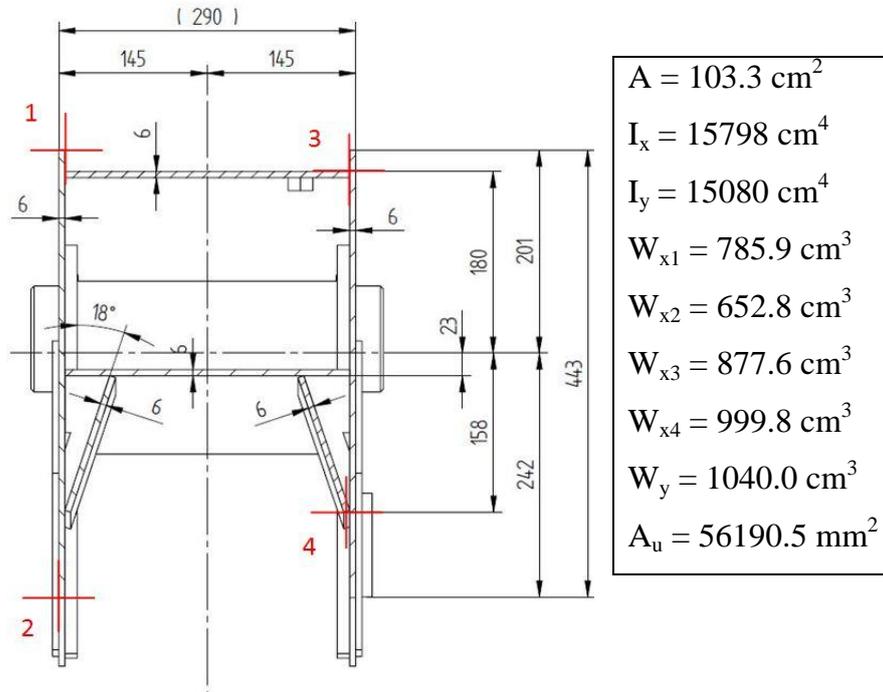
$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 8.48m$$

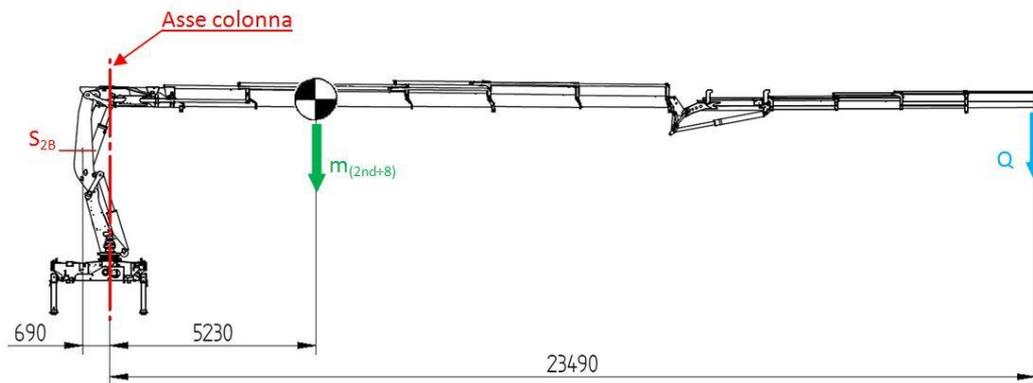
$$M_{t\max} = \overline{S}_{\max}\cdot\left(X_G\big|_{\overline{S}\max} + d_{S_{2,A,v}}\right) = 2333\cdot(10.91+0.67) \cong 327016Nm$$

$$M_{t\min} = \overline{S}_{\min}\cdot\left(X_G\big|_{\overline{S}\min} + d_{S_{2,A,v}}\right) == 1955\cdot(8.48+0.67) \cong 17888Nm$$

$$\Delta\tau_{Sd} = \tau_{\max} - \tau_{\min} = \frac{M_{t\max}}{2\cdot s\cdot A_u} - \frac{M_{t\min}}{2\cdot s\cdot A_u} = \frac{(327016-17888)\cdot 10^3}{2\cdot 6\cdot 71568} = 10.6\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\tau_{Sd} = 10.6\frac{N}{mm^2} \le \Delta\tau_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione B-B

Le sollecitazioni sono le stesse viste per la sezione A-A.

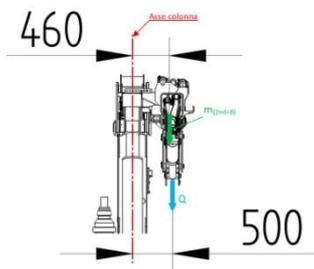
Azioni sul piano verticale

$$P' \cong 23406N$$

$$Q' \cong 4862N$$

$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,B,v}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} + d_{S_{2,B,v}}\right) =$$
$$= 23406 \cdot (5.23 + 0.69) + 4862 \cdot (23.49 + 0.69) \cong 256127Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,B,v}}\right) = 23406 \cdot (5.23 + 0.69) = 138564 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{256127 - 138564}{652.8} = 180.1 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 180.1 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano laterale

Si presentano le stesse sollecitazioni che, quando il braccio principale era sull'orizzontale, generavano la torsione dovuta all'inzancatura.

$$M_{f,L,\max} = 1208 Nm$$

$$M_{f,L,\min} = 998 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,L,\max}}{W_y} - \frac{M_{f,L,\min}}{W_y} = \frac{1208 - 998}{1040.0} = 0.20 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 0.20 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni torsionali

I carichi dovuti alla rotazione dei comandi sono quelli già visti durante la verifica del braccio secondario.

$$\bar{S}_{max} = 2333N$$

$$\bar{S}_{min} = 1955N$$

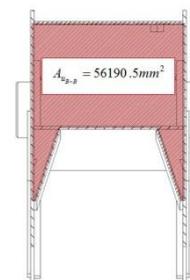
$$X_G\big|_{\bar{S}\,max} = 10.91m$$

$$X_G\big|_{\bar{S}\,min} = \mathrm{d}_{P'} = 8.48m$$

$$M_{t\,max} = \bar{S}_{max} \cdot \left(X_G\big|_{\bar{S}\,max} + d_{S_{2,A,v}} \right) = 2333 \cdot (10.91 + 0.69) \cong 27063Nm$$

$$M_{t\,min} = \bar{S}_{min} \cdot \left(X_G\big|_{\bar{S}\,min} + d_{S_{2,A,v}} \right) == 1955 \cdot (8.48 + 0.69) \cong 17927Nm$$

$$\Delta\tau_{Sd} = \tau_{max} - \tau_{min} = \frac{M_{t\,max}}{2 \cdot s \cdot A_u} - \frac{M_{t\,min}}{2 \cdot s \cdot A_u} = \frac{(27063 - 17927) \cdot 10^3}{2 \cdot 6 \cdot 56190.5} = 13.5\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\tau_{Sd} = 13.5\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\tau_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Prolunga integrale PIQS 60

Verifica della sezione S_{18}: 4° braccio sfilabile

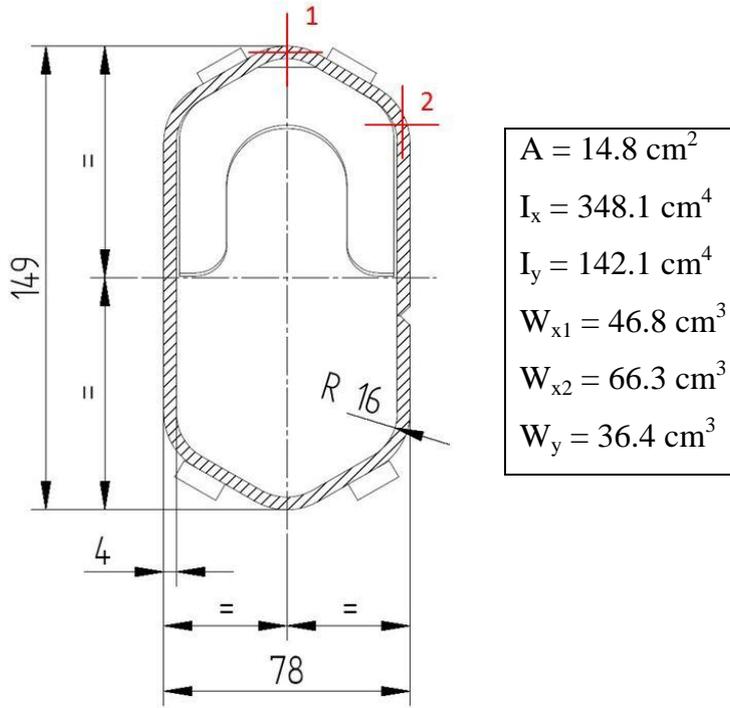
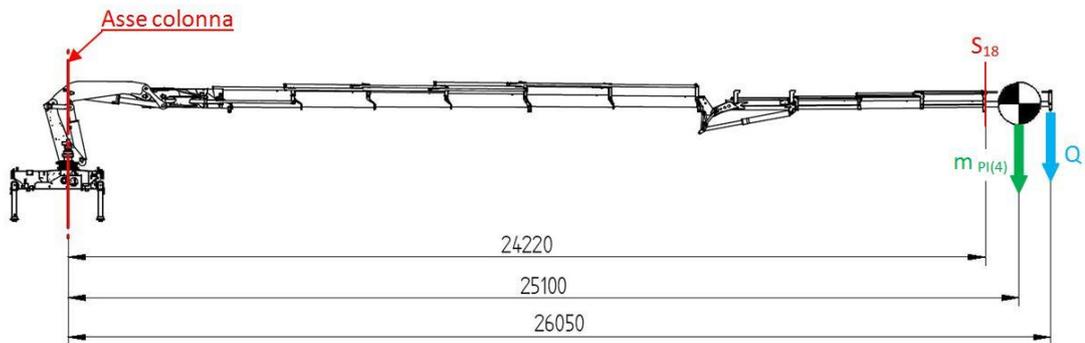
$A = 14.8\ cm^2$

$I_x = 348.1\ cm^4$

$I_y = 142.1\ cm^4$

$W_{x1} = 46.8\ cm^3$

$W_{x2} = 66.3\ cm^3$

$W_y = 36.4\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$P' = \phi_1 \cdot m_{PI(4)} \cdot g = 1.1 \cdot (25+32) \cdot 9.81 \cong 615N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

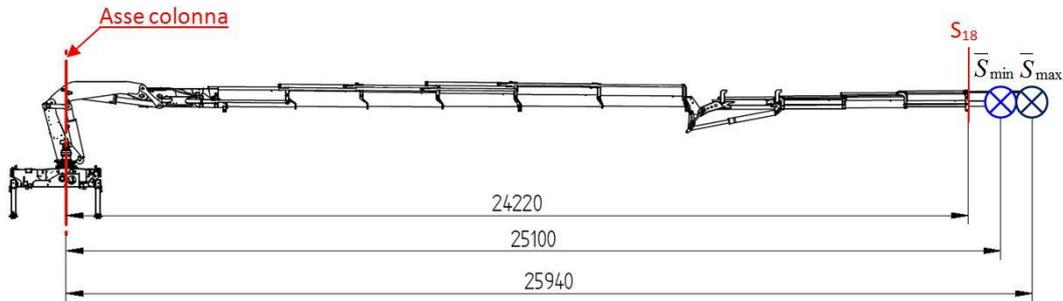
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{18}}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_{18}}) =$$
$$= 615 \cdot (25.10 - 24.22) + 4862 \cdot (26.05 - 24.22) = 9439Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{18}}) = 615 \cdot (25.10 - 24.22) = 5414Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_1}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_1}} = \frac{9439 - 5414}{46.8} = 190.1\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 190.1\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,4°sfilo} = \left(m_{PI(4)} + Q\right)\cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(57 + 420\right)\cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 409N$$

$$F_{hi,\min,4°sfilo} = m_{PI(4)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 57 \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 49N$$

$$\overline{S}_{\max,4°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,4°sfilo} = 1.05 \cdot 409 \cong 429N$$

$$\overline{S}_{\min,4°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,4°sfilo} = 1.05 \cdot 49 \cong 51N$$

$\overline{S}_{\max}$ ed $\overline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\underline{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{S_{18}} \cdot \mathrm{m}_{PI(4)} + \mathrm{d}_{Q'} \cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m}_{PI(4)} + \mathrm{Q})} = \frac{25.10 \cdot 57 + 26.05 \cdot 420}{(57 + 420)} = 25.94m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 25.10m$$

$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{18}}\right) = 429 \cdot (25.94 - 24.22) \cong 738Nm$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{18}}\right) = 51 \cdot (25.10 - 24.22) \cong 45Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{738 - 45}{66.3} = 14.8\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 14.8\frac{N}{mm^2} \le \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_{17}: 3° braccio sfilabile

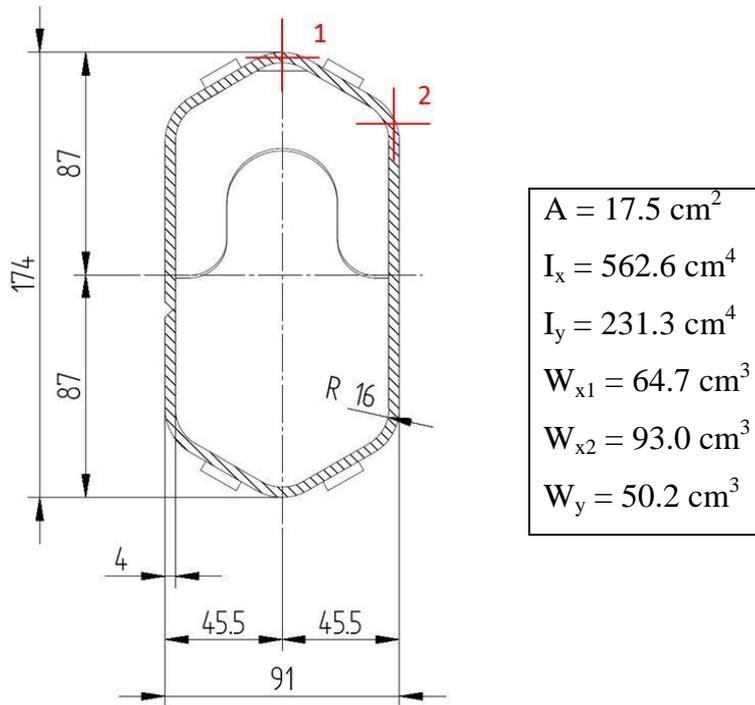
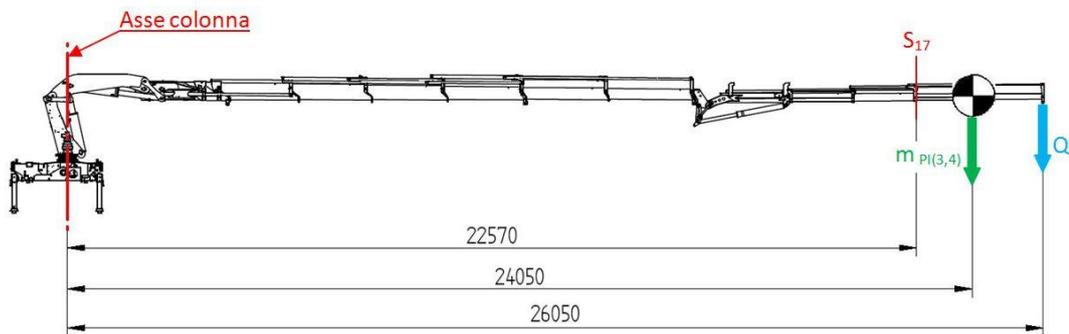
A = 17.5 cm^2

I_x = 562.6 cm^4

I_y = 231.3 cm^4

W_{x1} = 64.7 cm^3

W_{x2} = 93.0 cm^3

W_y = 50.2 cm^3

Azioni sul piano verticale

$$m_{PI(3,4)} = 32 + 41 + 25 + 23 = 121$$

$$P' = \phi_1 \cdot m_{PI(3,4)} \cdot g = 1.1 \cdot 121 \cdot 9.81 \cong 1306N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

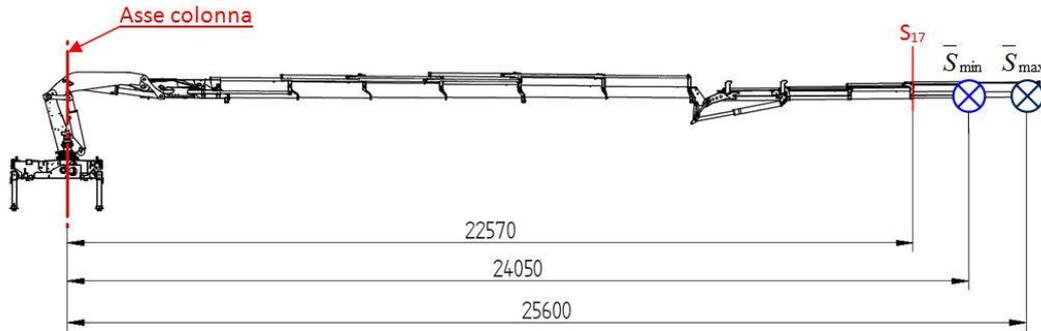
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{17}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_{17}}\right) =$$
$$= 1306 \cdot (24.05 - 22.57) + 4862 \cdot (26.05 - 22.57) = 18853Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{17}}\right) = 1906 \cdot (24.05 - 22.57) = 1933Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_1}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_1}} = \frac{18853 - 1933}{64.7} = 261.5\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 247.7\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,3°sfilo} = \left(m_{PI(3,4)} + Q\right)\cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(121+420\right)\cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 464N$$

$$F_{hi,\min,3°sfilo} = m_{PI(3,4)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 121 \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 104N$$

$$\overline{S}_{\max,3°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,3°sfilo} = 1.05 \cdot 464 \cong 487N$$

$$\overline{S}_{\min,3°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,3°sfilo} = 1.05 \cdot 104 \cong 110N$$

$\overline{S}_{\max}$ ed $\overline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\underline{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{S_{17}} \cdot \mathrm{m}_{\mathrm{PI}(3,4)} + \mathrm{d}_{\mathrm{Q'}} \cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m}_{\mathrm{PI}(3,4)} + \mathrm{Q})} = \frac{24.05 \cdot 121 + 26.05 \cdot 420}{(121+420)} = 25.60m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d}_{\mathrm{P'}} = 25.10m$$

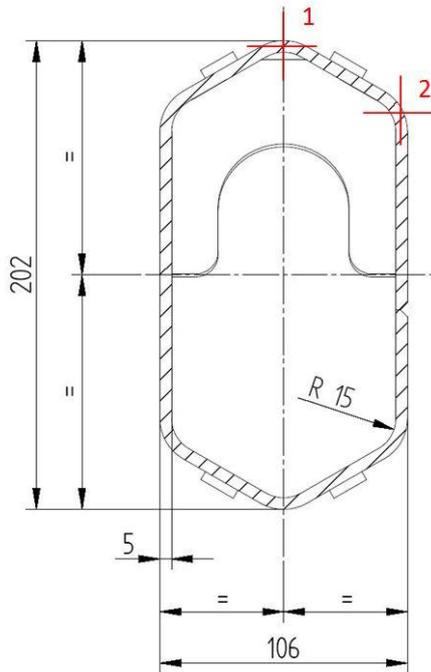
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{17}}\right) = 487 \cdot \left(25.60 - 22.57\right) \cong 1476Nm$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{17}}\right) = 51 \cdot \left(24.05 - 22.57\right) \cong 163Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{1476-163}{50.2} = 26.2\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 26.2 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

<u>Verificata</u>

Verifica della sezione S_{16}: 2° braccio sfilabile

A = 25.3 cm^2

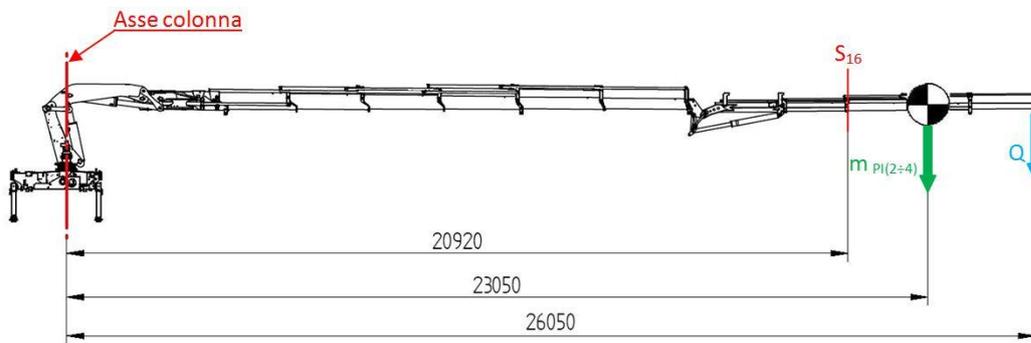
I_x = 1085.0 cm^4

I_y = 452.1 cm^4

W_{x1} = 107.4 cm^3

W_{x2} = 153.9 cm^3

W_y = 85.3 cm^3

Azioni sul piano verticale

$$m_{PI(2\div4)} = 32+41+43+25+23+24 = 188kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot m_{PI(3,4)} \cdot g = 1.1 \cdot 121 \cdot 9.81 \cong 2029N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

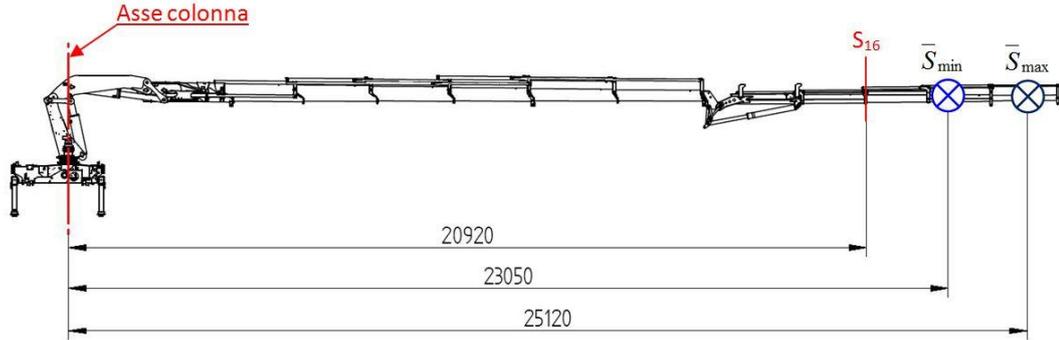
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{16}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_{16}}\right) =$$
$$= 2029 \cdot (23.05 - 20.92) + 4862 \cdot (26.05 - 20.92) = 29264Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{16}}\right) = 2029 \cdot (23.05 - 20.92) = 4322Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_1}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_1}} = \frac{29264 - 4322}{107.4} = 232.2 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 232.2\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\bar{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,2°sfilo} = \left(m_{PI\,(2\div4)} + Q\right)\cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(188 + 420\right)\cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 522N$$

$$F_{hi,\min,2°sfilo} = m_{PI\,(2\div4)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 188 \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 161N$$

$$\bar{S}_{\max,2°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,2°sfilo} = 1.05 \cdot 522 \cong 548N$$

$$\bar{S}_{\min,2°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,2°sfilo} = 1.05 \cdot 161 \cong 169N$$

$\bar{S}_{\max}$ ed $\bar{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\underline{S}\max} = \frac{d_{S_{16}} \cdot m_{PI(2\div4)} + d_{Q'} \cdot Q}{(m_{PI(2\div4)} + Q)} = \frac{23.05 \cdot 188 + 26.05 \cdot 420}{(188 + 420)} = 25.12m$$

$$X_G\big|_{\bar{S}\min} = d_{P'} = 23.05m$$

$$M_{f,o,\max} = \bar{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{16}}\right) = 548 \cdot \left(25.12 - 20.92\right) \cong 2302Nm$$

$$M_{f,o,\min} = \bar{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{16}}\right) = 169 \cdot \left(23.05 - 20.92\right) \cong 360Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{2302 - 360}{85.3} = 22.8\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 22.8\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_{15}: 1° braccio sfilabile

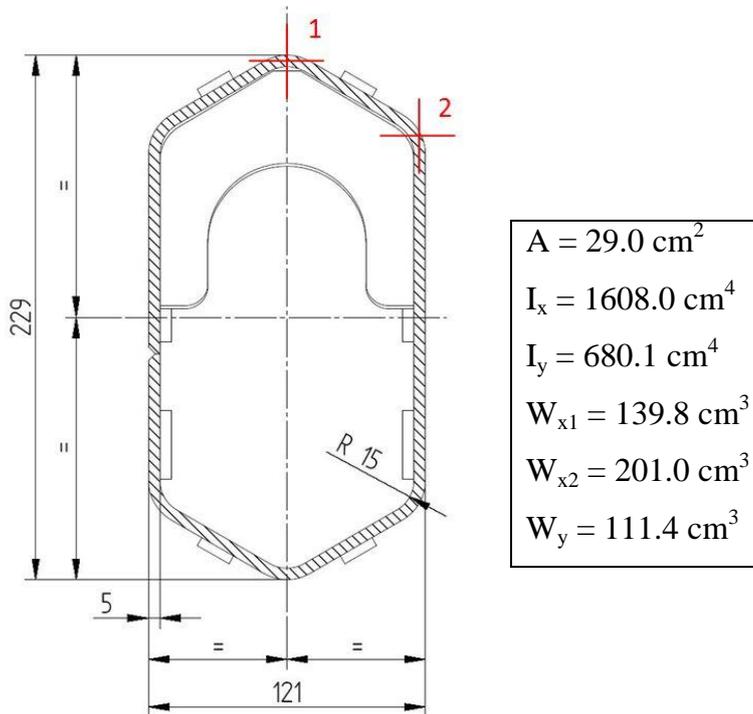
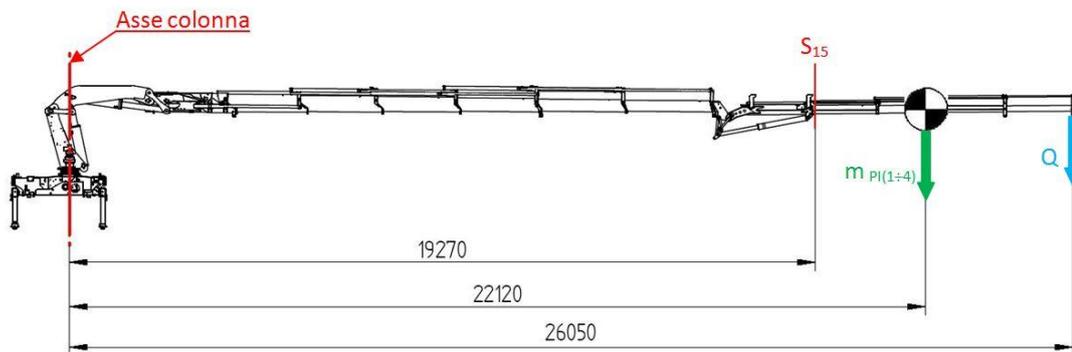
$A = 29.0\ cm^2$

$I_x = 1608.0\ cm^4$

$I_y = 680.1\ cm^4$

$W_{x1} = 139.8\ cm^3$

$W_{x2} = 201.0\ cm^3$

$W_y = 111.4\ cm^3$

Azioni sul piano verticale

$$m_{PI(1\div4)} = 32+41+43+53+25+23+24+24 = 265kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot m_{PI(2\div4)} \cdot g = 1.1 \cdot 265 \cdot 9.81 \cong 2860N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

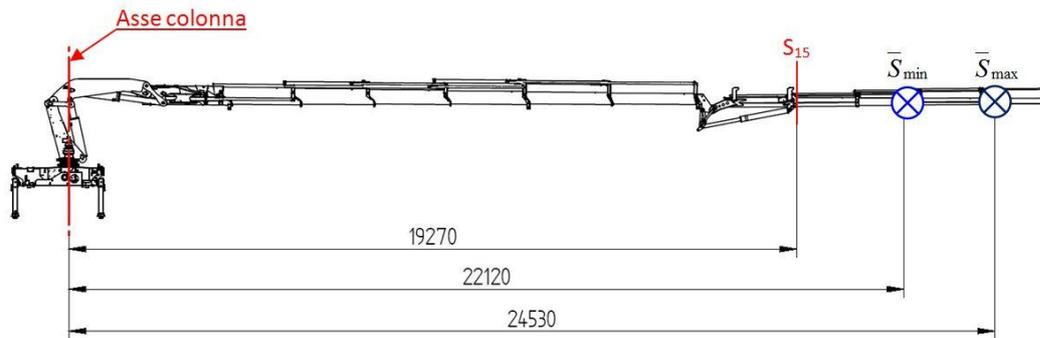
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{15}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} - d_{S_{15}}\right) =$$
$$= 2860 \cdot (22.12 - 19.27) + 4862 \cdot (26.05 - 19.27) = 41115Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} - d_{S_{15}}\right) = 2860 \cdot (22.12 - 19.27) = 8151Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_1}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_1}} = \frac{41115 - 8151}{139.8} = 235.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 235.8\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,1°sfilo} = \left(m_{PI(1\div4)} + Q\right)\cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = \left(265 + 420\right)\cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 588N$$

$$F_{hi,\min,1°sfilo} = m_{PI(1\div4)} \cdot g \cdot tg\left(\alpha_{\max}\right) = 265 \cdot 9.81 \cdot tg\left(5°\right) \cong 227N$$

$$\overline{S}_{\max,1°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,1°sfilo} = 1.05 \cdot 588 \cong 617N$$

$$\overline{S}_{\min,1°sfilo} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,1°sfilo} = 1.05 \cdot 227 \cong 239N$$

$\overline{S}_{\max}$ ed $\overline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{d_{S_{15}} \cdot m_{PI(1\div4)} + d_{Q'} \cdot Q}{(m_{PI(1\div4)} + Q)} = \frac{22.12 \cdot 265 + 26.05 \cdot 420}{(265 + 420)} = 24.53m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = d_{P'} = 22.12m$$

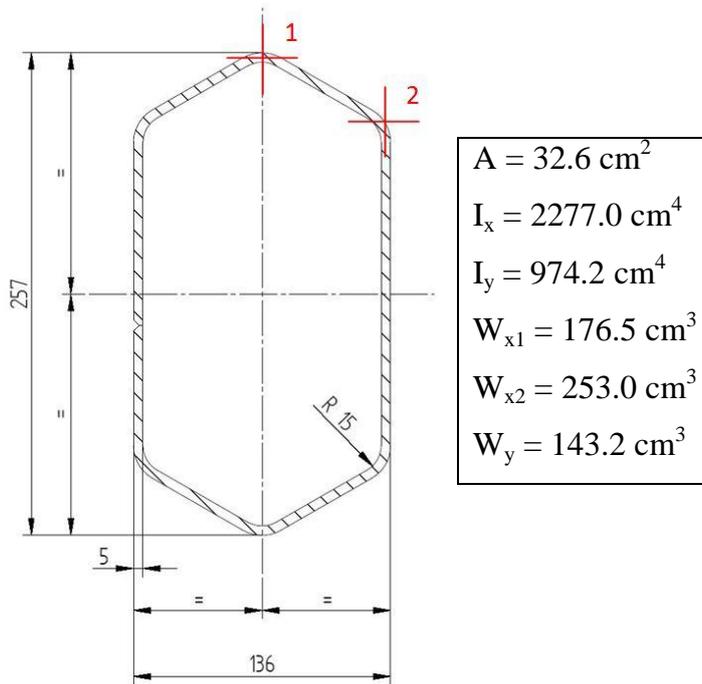
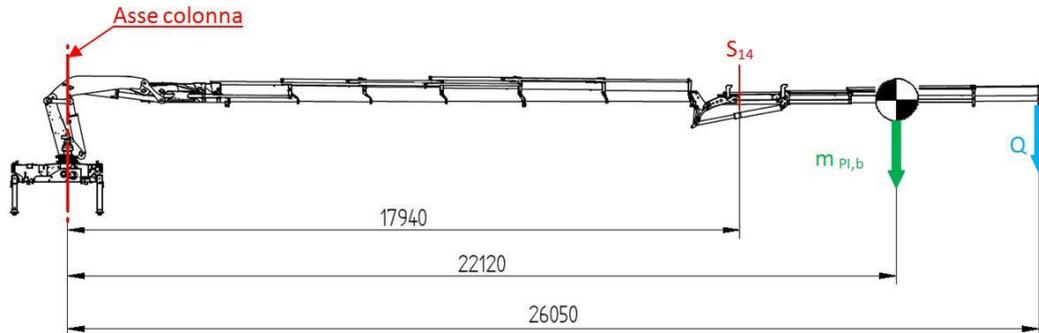
$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G\big|_{\overline{S}\max} - d_{S_{15}}\right) = 617 \cdot \left(24.53 - 19.27\right) \cong 3245Nm$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G\big|_{\overline{S}\min} - d_{S_{15}}\right) = 239 \cdot \left(22.12 - 19.27\right) \cong 681Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{3245 - 681}{111.4} = 23.0\frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 23.0\frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6\frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Verifica della sezione S_{14}: braccio

Azioni sul piano verticale

Faccio le stesse considerazioni viste per il braccio principale: vista l'impossibilità nel calcolare le masse a valle della sezione S_{14} ed il buon bilanciamento delle masse dell'elemento in esame, considero che la massa della parte di braccio che contribuisce a generare momento flettente sia metà della massa totale del braccio.
In tale ipotesi è stato sottinteso considerare anche metà massa del pistone dell'articolazione, a favore di sicurezza

$$m_{PI,b} = 32 + 41 + 43 + 53 + \frac{100}{2} + 25 + 23 + 24 + 24 + \frac{50}{2} = 340kg$$

$$P' = \phi_1 \cdot m_{PI,b} \cdot g = 1.1 \cdot 340 \cdot 9.81 \cong 3667N$$

$$Q' = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 420 \cdot 9.81 \cong 4862N$$

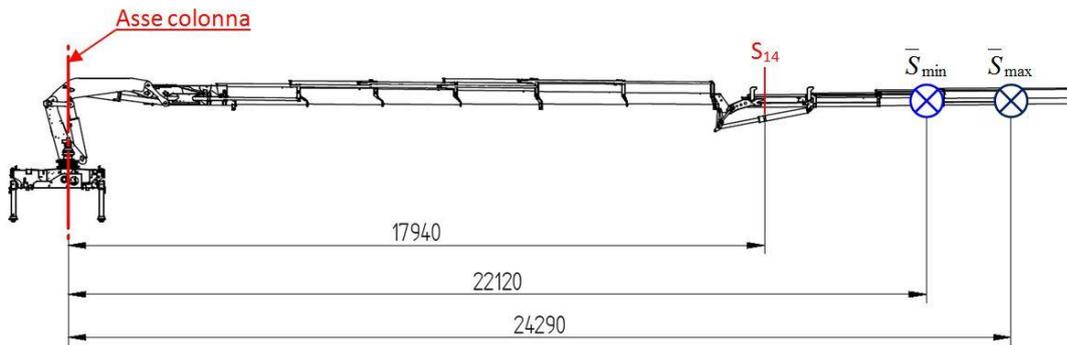
$$M_{f,v,\max} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{14}}) + Q' \cdot (d_{Q'} - d_{S_{14}}) =$$
$$= 3667 \cdot (22.12 - 17.94) + 4862 \cdot (26.05 - 17.94) = 54759Nm$$

$$M_{f,v,\min} = P' \cdot (d_{P'} - d_{S_{14}}) = 3667 \cdot (22.12 - 17.94) = 15328Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_1}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_1}} = \frac{54759 - 15328}{176.5} = 223.4 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 223.4 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Azioni sul piano orizzontale

$$\overline{S} = \phi_5 \cdot F_{hi}$$

$$F_{hi,\max,braccio} = (m_{PI,b} + Q) \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = (340 + 420) \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 620N$$

$$F_{hi,\min,braccio} = m_{PI,b} \cdot g \cdot tg(\alpha_{\max}) = 340 \cdot 9.81 \cdot tg(5°) \cong 292N$$

$$\overline{S}_{\max,braccio} = \phi_5 \cdot F_{hi,\max,braccio} = 1.05 \cdot 620 \cong 641N$$

$$\overline{S}_{\min,braccio} = \phi_5 \cdot F_{hi,\min,braccio} = 1.05 \cdot 292 \cong 306N$$

$\overline{S}_{\max}$ ed $\overline{S}_{\min}$ agiscono sui centri di massa: calcolo le distanze dei baricentri dall'asse colonna

$$X_G\big|_{\overline{S}\max} = \frac{\mathrm{d}_{S_{14}} \cdot \mathrm{m}_{PI,b} + \mathrm{d}_{Q'} \cdot \mathrm{Q}}{(\mathrm{m}_{PI,b} + \mathrm{Q})} = \frac{22.12 \cdot 340 + 26.05 \cdot 420}{(340 + 420)} = 24.29m$$

$$X_G\big|_{\overline{S}\min} = \mathrm{d}_{P'} = 22.12m$$

$$M_{f,o,\max} = \overline{S}_{\max} \cdot \left(X_G \big|_{\underline{S}\max} - d_{S_{14}} \right) = 641 \cdot (24.29 - 17.94) \cong 4070 Nm$$

$$M_{f,o,\min} = \overline{S}_{\min} \cdot \left(X_G \big|_{\underline{S}\min} - d_{S_{14}} \right) = 306 \cdot (22.12 - 17.94) \cong 1279 Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{fo,\max}}{W_y} - \frac{M_{fo,\min}}{W_y} = \frac{4070 - 1279}{143.2} = 19.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 19.5 \frac{N}{mm^2} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 393.6 \frac{N}{mm^2}$$

Verificata

Resistenza statica

La verifica della resistenza sotto sollecitazione quasi-statica protegge contro deformazioni eccessive dovute allo snervamento del materiale o allo slittamento di collegamenti a frizione così come contro la rottura statica di elementi o collegamenti
strutturali.
Le verifiche devono essere fatte per elementi e collegamenti strutturali tenendo conto del più sfavorevole effetto dei carichi (prospetto 10 della EN 13001-2).

Le sollecitazioni e forze limiti di progetto devono essere calcolate con:

- Sollecitazioni limiti di progetto f_{Rd} = funzione (f_k, γ_R) o
- Forze limiti di progetto F Rd = funzione (F_k, , γ_R)

dove:

- f_k o F_k sono valori caratteristici (o valori nominali);
- γ_R è il coefficiente di resistenza risultante $\gamma_R = \gamma_m \cdot \gamma_s$;
- γ_m è il coefficiente di resistenza (γ_m = 1,1);
- γ_s è il coefficiente di resistenza specifica generale per parti speciali di questa norma.

Sollecitazione limite di progetto in elementi strutturali

La sollecitazione limite di progetto f_{Rd}, usata per il progetto di elementi strutturali, deve essere calcolata con:

- $f_{Rd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{Rm}}$ per sollecitazioni normali
- $f_{Rd} = \frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{Rm}}$ per sollecitazioni di taglio

con $\gamma_R = \gamma_m \cdot \gamma_s$
dove:

- f_{yk} è il valore nominale dello snervamento del materiale;
- γ_{sm} è il coefficiente di resistenza specifica per il materiale come segue:

- Per materiale non laminato
  - γ_{sm} = 1,0
- Per materiale laminato (es. lamiere e profilati):
  - γ_{sm} = 1,0 per sollecitazioni nel piano di laminazione
  - γ_{sm} = 1,0 per sollecitazioni di compressione e taglio

  Per sollecitazioni di trazione perpendicolari al piano di laminazione:
  - γ_{sm} = 1,0 per materiale in classe qualitativa Z25 o Z35 secondo la EN 10164
  - γ_{sm} = 1,16 per materiale in classe qualitativa Z15 secondo la EN 10164
  - γ_{sm} = 1,34 senza classificazione di qualità

Verifica per elementi strutturali

Per gli elementi strutturali da progettare si deve dimostrare che:

$\sigma_{Sd} \leq f_{Rd}$ e $\tau_{Sd} \leq f_{Rd}$

dove:

- σ_{Sd} , τ_{Sd} sono le sollecitazioni di progetto;
- f Rd è la sollecitazione limite di progetto corrispondente.

In caso di stati di sollecitazione piani bisogna in più dimostrare che:

$$\left(\frac{\sigma_{Sd,x}}{f_{Rd,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Sd,y}}{f_{Rd,y}}\right)^2 - \frac{\sigma_{Sd,x} \times \sigma_{Sd,y}}{f_{Rd,x} \times f_{Rd,y}} + \left(\frac{\tau_{Sd}}{f_{Rd}}\right)^2 \leq 1.1$$

dove:

- x, y indicano le direzioni ortogonali delle sollecitazioni.

Stati spaziali di sollecitazione possono essere ridotti allo stato piano di sollecitazione più sfavorevole.

Collegamenti con perni

I collegamenti con perni sono considerati come collegamenti che permettono la rotazione delle parti collegate.

Forze limiti di progetto nei perni

Il perno di un collegamento con perno deve essere progettato tenendo conto della flessione, del taglio e della pressione specifica.
La norma assume il seguente schema semplificato:
Per i perni si deve tenere conto dei seguenti carichi limiti di progetto:

- Momento flettente limite di progetto

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_{Rp}}$$

con $\gamma_{Rp} = \gamma_m \cdot \gamma_{sp}$

dove:

- W_{el} è il modulo elastico della sezione del perno;
- f_{yp} è lo snervamento (valore nominale) del materiale del perno;
- γ_{sp} è il coefficiente di resistenza specifica per il momento flettente dei collegamenti con perni γ_{sp} = 1,0.

- Forza limite di taglio di progetto per piano di taglio per perni

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}}$$

con $\gamma_{Rp} = \gamma_m \cdot \gamma_{sp}$

dove:

- $u = \frac{4}{3}$ per perni pieni
- $u = \frac{4}{3} \times \frac{1+v+v^2}{1+v^2}$ per perni forati

dove: $v = \frac{D_i}{D_0}$,

- D_i è il diametro interno del perno;
- D_0 è il diametro esterno del perno;
- A è la sezione trasversale del perno;

γ_{sp} è il coefficiente di resistenza specifica per la forza di taglio dei collegamenti con perni:

- γ_{sp} = 1,0 per collegamenti con piano multiplo di taglio,

- γ_{sp} = 1,3 per collegamenti con piano singolo di taglio.

Verifica per collegamenti con perni

Per i perni si deve verificare che:

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$

$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$

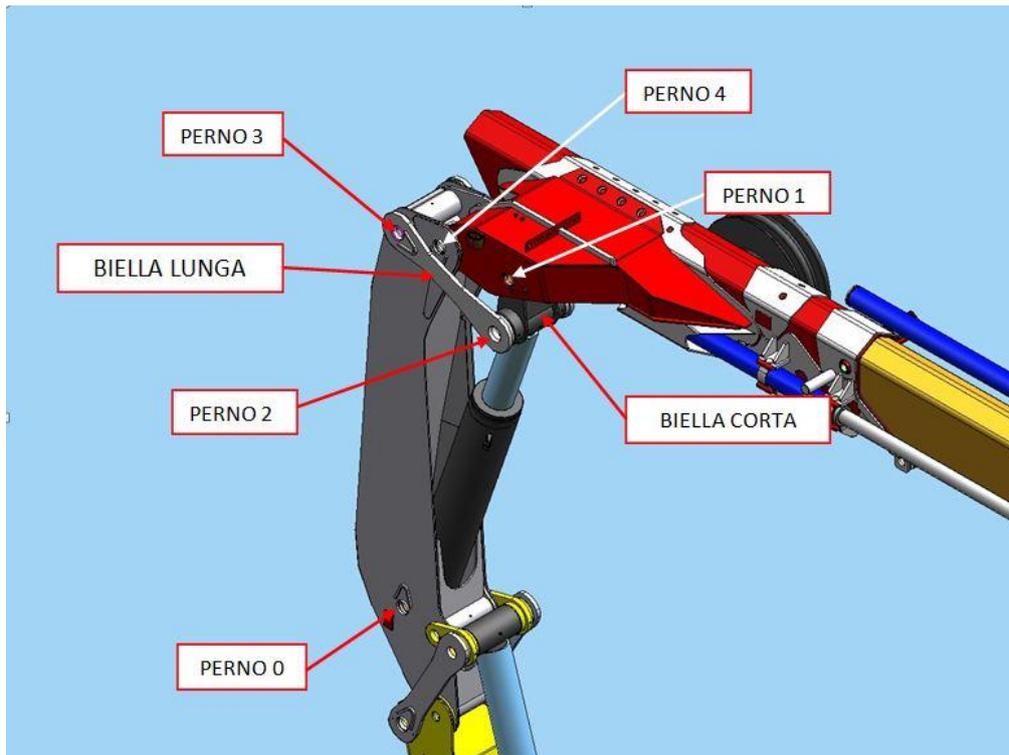
$F_{bi,Sd} \leq F_{b,Rd}$

dove:

- M_{Sd} è il valore di progetto del momento flettente nel perno;
- M_{Rd} è il momento flettente limite di progetto;
- $F_{v,Sd}$ è il valore di progetto della forza di taglio nel perno;
- $F_{v,Rd}$ è la forza limite di taglio di progetto;
- $F_{bi,Sd}$ è il valore decisivo di progetto della forza della bronzina nella piastra di
  giunzione "i" del collegamento con perno;
- $F_{b,Rd}$ è la forza limite di progetto della bronzina.

L'entità delle forze utilizzate per la verifica dei componenti dei biellismi secondario e principale sono stati forniti direttamente dalla ditta Copma2000: tali dati sono stati ottenuti da un foglio di lavoro "Excel", il quale, inserendo tutti i dati geometrici della macchina, fornisce per ogni intervallo (10mm) di corsa del pistone tutti i carichi agenti sugli organi considerati.

Si nota che lo sforzo massimo nella biella lunga del manovellismo principale si ha dopo 30mm di corsa del martinetto di comando: questo perché per i primi tratti di corsa la gru è chiusa su se stessa e quindi non in grado di lavorare.

Verifica del biellismo secondario

Trattandosi di una verifica, sono già note tutte le forze in gioco.

Sulla biella corta agisce una forza massima di compressione pari a

$F_{\max,compressione} = R_{24} = 104987N$

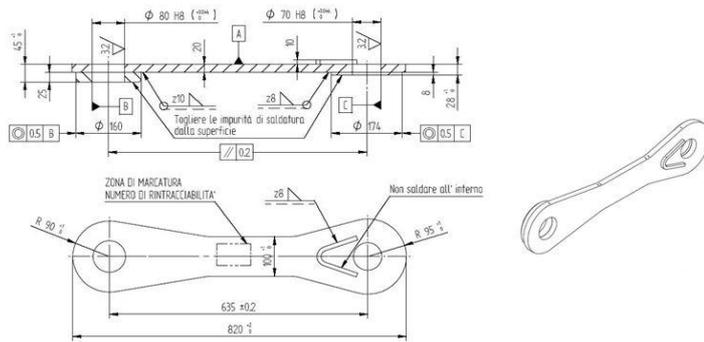
Sulla biella lunga agisce una forza massima di trazione pari a

$F_{\max,trazione} = R_{23} = 1614710N$

Verifica biella lunga

Materiale: StE 885 → S900 MC EN 10149-2

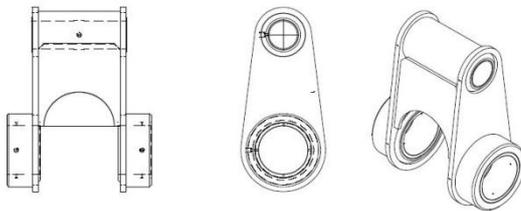
A favore di sicurezza prendo "S690"

Dalla UNI CEN/TS 13001-3-1: $f_{Rd} = 627 \frac{N}{mm^2}$

Verifica fusto biella

$$\sigma_{Sd} = \frac{R_{23}/2}{A} = \frac{161471/2}{20 \cdot 100} = 403.6 \frac{N}{mm^2}$$ **Verificato**

Verifica orecchie a strappo

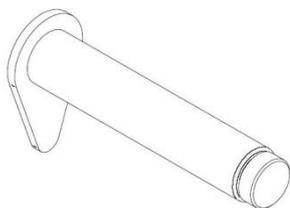
$$\sigma_{Sd} = \frac{R_{23}/2}{A} = \frac{161471/2}{(20 \cdot 60 + 8 \cdot 52)} = 499.6 \frac{N}{mm^2}$$ **Verificato**

Verifica biella corta

Materiale: StE 690 → S700

Dalla UNI CEN/TS 13001-3-1: $f_{Rd} = 618 \frac{N}{mm^2}$

Verifica fusto biella

$$\sigma_{Sd} = \frac{R_{24}}{A} = \frac{109870}{(24 \cdot 120 + 16 \cdot 174)} = 185.4 \frac{N}{mm^2}$$ **Verificato**

Verifica perno 0

Materiale: 35NiCrMo16 Ø60

l=18mm a=3mm

A=2826mm^2 W=21195mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd}=\frac{W\cdot f_{yp}}{\gamma_m\cdot\gamma_{sp}}=\frac{21195\cdot 900}{1.1\cdot 1.0}=17341363Nmm$$

$$M_{Sd}=\frac{F}{2}\cdot\left(\frac{l}{3}+a\right)=\frac{973890}{2}\cdot\left(\frac{18}{3}+3\right)=4382505Nmm$$

$M_{Sd}\leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd}=\frac{1}{u}\cdot\frac{A\cdot f_{yp}}{\sqrt{3}\cdot\gamma_m\cdot\gamma_{sp}}=\frac{3}{4}\cdot\frac{2826\cdot 900}{\sqrt{3}\cdot 1.1\cdot 1.0}=1001204N$$

$$F_{v,Sd}=\frac{F}{2}=\frac{973890}{2}=486945N$$

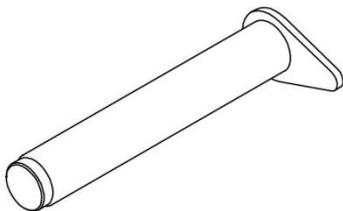
$F_{v,Sd}\leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd}=\frac{\alpha\cdot d\cdot t\cdot f_y}{\gamma_m\cdot\gamma_{sp}}=\frac{1\cdot 60\cdot 24\cdot 700}{1.1\cdot 0.7}=1309090N$$

$$F_{b,Sd}=\frac{F}{2}=\frac{973890}{2}=486945N$$

$F_{b,Sd}\leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Verifica perno 3

Materiale: 35NiCrMo16 Ø70

l=28mm a=1mm

A=3846mm^2 W=33565mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{33565 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 27536727 Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{F}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a \right) = \frac{1614710}{2} \cdot \left(\frac{28}{3} + 1 \right) = 8342668 Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{3846 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1362526 N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{F}{2} = \frac{1614710}{2} = 807355 N$$

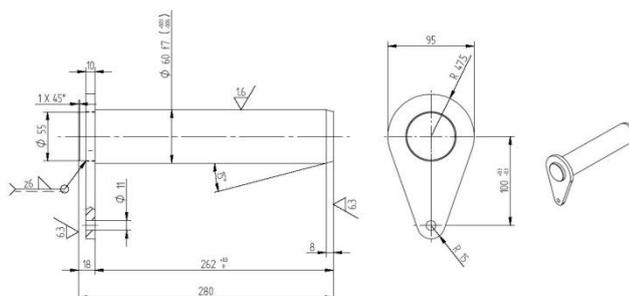
$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1 \cdot 70 \cdot 28 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 1781818 N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{F}{2} = \frac{1617410}{2} = 807355 N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

<u>Verifica perno 4</u>

Materiale: 35NiCrMo16 Ø60

l=20mm a=2mm

A=2826mm^2 W=21195mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{21195 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 17341363 Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{R_{24}}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a \right) = \frac{1049870}{2} \cdot \left(\frac{20}{3} + 3 \right) = 4549473 Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2826 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1001202 N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{R_{24}}{2} = \frac{1049870}{2} = 524935 N$$

$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 1090909 N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_{24}}{2} = \frac{1049870}{2} = 524935 N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Verifica perno 1

Le forze che agiscono sul perno 1 sono

R_{1x}^*=115550N

R_{1y}^*=575040N

da cui: R_1^*=586530N

Materiale: 35NiCrMo16 Ø60

l=24mm a=2mm

A=2826mm^2 W=21195mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{21195 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 17341363 Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{R_1^*}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a \right) = \frac{586530}{2} \cdot \left(\frac{24}{3} + 2 \right) = 2932650 Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2826 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1001202 N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{R_1^*}{2} = \frac{586530}{2} = 293265 N$$

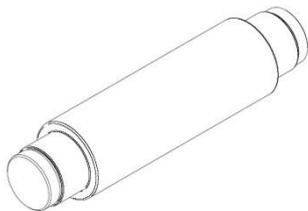
$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 1309090 N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_1^*}{2} = \frac{586530}{2} = 293265 N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Verifica perno 2

Sez. A-A

Materiale: 35NiCrMo16 Ø80

l=45mm a=1mm

A=5024mm^2 W=50240mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{50240 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 41105454 Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{R_{23}}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a\right) = \frac{1614710}{2} \cdot \left(\frac{45}{3} + 1\right) = 1291770 Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{5024 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1779918 N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{R_{23}}{2} = \frac{1614710}{2} = 807355 N$$

$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1.0 \cdot 80 \cdot 45 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 3272727 N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_{23}}{2} = \frac{1614710}{2} = 807355 N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

<u>Sez. B-B</u>

Materiale: 35NiCrMo16 Ø105

l_1=45mm a_1=1mm

l_2=71mm a_2=1mm

A=8654mm^2 W=113591mm^3

R_{23x}=1151340N R_{23y}=1132120N

R_{24x}=1022850N R_{24y}=166750N

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{113591 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 92938090 Nmm$$

$$M_{Sd,x} = \frac{R_{23x}}{2} \cdot \left(\frac{l_1}{3} + a_1 + l_2 + a_2 \right) - \frac{R_{14x}}{2} \cdot \left(\frac{l_2}{2} + a_2 \right) =$$

$$= \frac{1151340}{2} \cdot \left(\frac{45}{3} + 1 + 71 + 1 \right) - \frac{1132120}{2} \cdot \left(\frac{71}{2} + 1 \right) = 3199190 Nmm$$

$$M_{Sd,y} = \frac{R_{23y}}{2} \cdot \left(\frac{l_1}{3} + a_1 + l_2 + a_2 \right) - \frac{R_{14y}}{2} \cdot \left(\frac{l_2}{2} + a_2 \right) =$$

$$= \frac{1022850}{2} \cdot \left(\frac{45}{3} + 1 + 71 + 1 \right) - \frac{166750}{2} \cdot \left(\frac{71}{2} + 1 \right) = 4677010 Nmm$$

$$M_{Sd} = \sqrt{M_{Sd,x}{}^2 + M_{Sd,y}{}^2} = 5666501 Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{8650 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 3065965 N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{F_s}{2} = \frac{973980}{2} = 486990 N$$

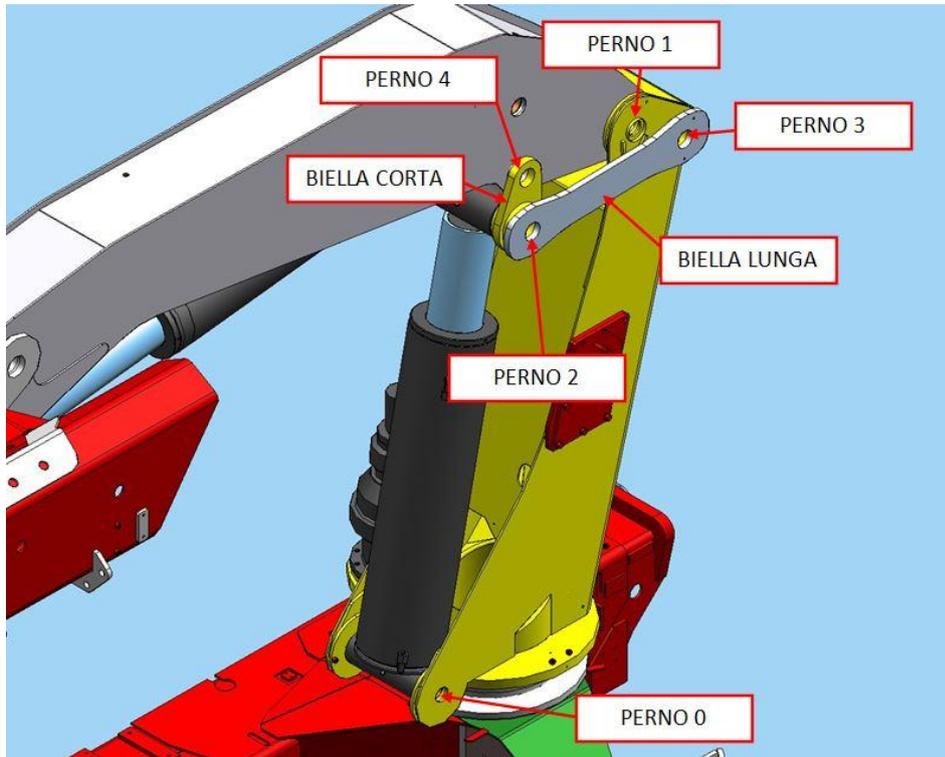
$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1.0 \cdot 105 \cdot 71 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 6777272 N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_{24}}{2} = \frac{1036353}{2} = 518177 N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Verifica del biellismo principale

Sulla biella corta agisce una forza massima di compressione pari a

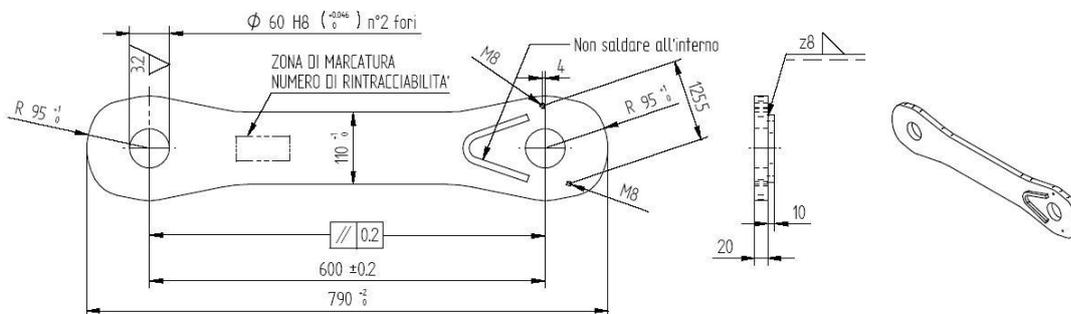
$F_{\max,compressione} = R_{24} = 1227500N$

Sulla biella lunga agisce una forza massima di trazione pari a

$F_{\max,trazione} = R_{23} = 1194500N$

ed una forza massima di compressione pari a:

$F_{\max,compressione} = 29413N$

Verifica biella lunga

Materiale: StE 885 → S900 MC EN 10149-2

A favore di sicurezza prendo "S690"

Dalla UNI CEN/TS 13001-3-1: $f_{Rd} = 627 \frac{N}{mm^2}$

Verifica fusto biella

Verifica a trazione

$$\sigma_{Sd} = \frac{R_{23}/2}{A} = \frac{1194500/2}{20 \cdot 110} = 271.4 \frac{N}{mm^2} \qquad \textbf{Verificato}$$

Verifica a carico di punta

a = 20 mm   b = 110 mm

$l_0 = l = 600$ mm

$$\rho_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{b \cdot a^2}{12} \cdot \frac{1}{a \cdot b}} = \frac{a}{\sqrt{12}} = \frac{20}{\sqrt{12}} = 5.77mm$$

$$\lambda = \frac{l_0}{\rho_{\min}} = \frac{600}{5.77} = 104$$

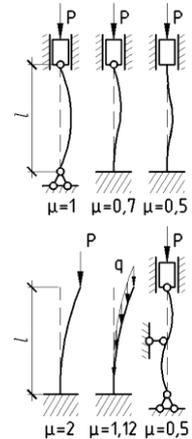
ω = 6.43   (da tab.)

DASI-Ri 011 Seite 7

Tabelle 8. Knickzahlen ω für Bauteile aus StE 690

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
20	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,09	20
30	1,10	1,11	1,12	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,20	1,22	30
40	1,23	1,25	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,41	40
50	1,43	1,46	1,48	1,51	1,53	1,56	1,58	1,62	1,66	1,72	50
60	1,78	1,84	1,90	1,96	2,03	2,09	2,16	2,22	2,29	2,36	60
70	2,43	2,50	2,57	2,64	2,71	2,78	2,86	2,93	3,01	3,09	70
80	3,17	3,25	3,33	3,41	3,49	3,58	3,66	3,75	3,83	3,92	80
90	4,01	4,10	4,19	4,28	4,37	4,47	4,56	4,66	4,75	4,85	90
100	4,95	5,05	5,15	5,25	5,35	5,46	5,56	5,67	5,77	5,88	100
110	5,99	6,10	6,21	6,32	6,43	6,55	6,66	6,78	6,89	7,01	110
120	7,13	7,25	7,37	7,49	7,61	7,13	7,86	7,98	8,11	8,24	120
130	8,37	8,50	8,63	8,76	8,89	9,02	9,16	9,29	9,43	9,56	130
140	9,70	9,84	9,98	10,12	10,26	10,41	10,55	10,70	10,84	10,99	140
150	11,14	11,29	11,44	11,59	11,74	11,90	12,05	12,20	12,36	12,51	150

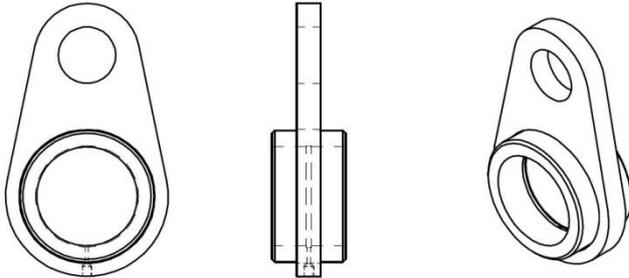
Weitere Werte aus $\omega = 0{,}000495 \cdot \lambda^2$.

$$f_{Sd} = \frac{\frac{F}{2} \cdot \omega}{A} = \frac{\frac{29413}{2} \cdot 6.43}{20 \cdot 110} = 43.2 \frac{N}{mm^2}$$

$f_{Sd} \le f_{Rd}$ **Verificato**

Verifica orecchie a strappo

$$f_{Sd} = \frac{R_{23}/2}{A} = \frac{1194500/2}{20 \cdot 65} = 459.4 \frac{N}{mm^2}$$

$f_{Sd} \leq f_{Rd}$ **Verificato**

Verifica biella corta

Materiale: StE 690 → S700

Dalla UNI CEN/TS 13001-3-1: $f_{Rd} = 618 \frac{N}{mm^2}$

Verifica fusto biella

Verifica a carico di punta

a = 20 mm b = 170 mm

$l_0 = l = 150$ mm

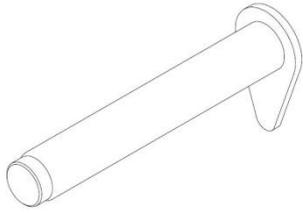
$$\rho_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{b \cdot a^2}{12} \cdot \frac{1}{a \cdot b}} = \frac{a}{\sqrt{12}} = \frac{20}{\sqrt{12}} = 5.77mm$$

$$\lambda = \frac{l_0}{\rho_{\min}} = \frac{150}{5.77} = 27$$

ω = 1.07 (da tab.)

$$f_{Sd} = \frac{\frac{F}{2} \cdot \omega}{A} = \frac{\frac{1227500}{2} \cdot 1.07}{20 \cdot 120} = 273.7 \frac{N}{mm^2}$$

$f_{Sd} \leq f_{Rd}$ **Verificato**

Verifica perno 0

Materiale: 35NiCrMo16 Ø60

l=26mm a=1.5mm

A=2826mm^2 W=21195mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{21195 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 17341363Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{F}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a \right) = \frac{1216420}{2} \cdot \left(\frac{26}{3} + 1.5 \right) = 6183500Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2826 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1001202N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{F}{2} = \frac{1216420}{2} = 608210N$$

$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1 \cdot 60 \cdot 26 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 1418181N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{F}{2} = \frac{1216420}{2} = 608210N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Verifica perno 3

Materiale: 35NiCrMo16 Ø60

l=20mm   a=1mm

A=2826mm^2 W=21195mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{21195 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 17341363 Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{R_{23}}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a \right) = \frac{1194500}{2} \cdot \left(\frac{20}{3} + 1 \right) = 4578920 Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2826 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1001202 N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{R_{23}}{2} = \frac{1194500}{2} = 597250 N$$

$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

Biella

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1 \cdot 60 \cdot 26 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 1418181 N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_{23}}{2} = \frac{1194500}{2} = 597250 N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

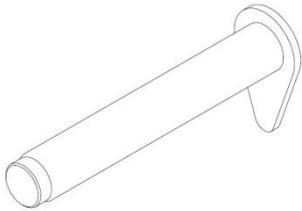
Bronzina

A livello indicativo, si esegue anche una verifica della bronzina.

Per il calcolo della tensione di snervamento ho considerato una bronzina "Himon BRM-10, CuSn8" avente tensione di snervamento $\in$ [270,700] N/mm^2.

Le bronzine sono state progettate per non lavorare oltre i 100-110 N/mm^2: per tale verifica si assume il valore minimo di 270 N/mm^2.

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1 \cdot 60 \cdot 40 \cdot 270}{1.1 \cdot 0.7} = 841558N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_{23}}{2} = \frac{1194500}{2} = 597250N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Verifica perno 4

Materiale: 35NiCrMo16 Ø60

l=20mm a=1mm

A=2826mm^2 W=21195mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{21195 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 17341363Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{R_{24}}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a \right) = \frac{1227500}{2} \cdot \left(\frac{20}{3} + 1 \right) = 4705420Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2826 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1001202N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{R_{24}}{2} = \frac{1227500}{2} = 613750N$$

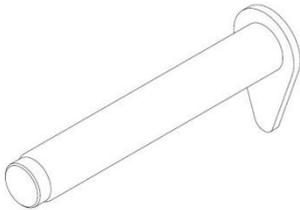
$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 1090908N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_{24}}{2} = \frac{1227500}{2} = 613750N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Verifica perno 1

Le forze che agiscono sul perno 1, considerando anche le sollecitazioni di flessione e torsione che vanno a scaricarsi sul biellismo, sono:

R_{1x}^*=203600N

R_{1y}^*=599050N

da cui: R_1^*=632700N

Materiale: 35NiCrMo16 Ø60

l=26mm a=2mm

A=2826mm^2 W=21195mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{21195 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 17341363Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{R_1^*}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a \right) = \frac{632700}{2} \cdot \left(\frac{26}{3} + 2 \right) = 35993600Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2826 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1001202N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{R_1^*}{2} = \frac{632700}{2} = 316350N$$

$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1 \cdot 60 \cdot 26 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 1418181N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_1^*}{2} = \frac{632700}{2} = 316350N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Verifica perno 2

Sez. A-A

Materiale: 35NiCrMo16 Ø60

l=20mm a=1mm

A=2826mm^2 W=21195mm^3

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{21195 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 17341363Nmm$$

$$M_{Sd} = \frac{R_{23}}{2} \cdot \left(\frac{l}{3} + a \right) = \frac{1194500}{2} \cdot \left(\frac{20}{3} + 1 \right) = 4578920Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2826 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 1001204N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{R_{23}}{2} = \frac{1194500}{2} = 597250N$$

$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1.0 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 1090909N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_{23}}{2} = \frac{1194500}{2} = 597250N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

<u>Sez. B-B</u>

Materiale: 35NiCrMo16 Ø100

l_1=20mm a_1=1mm

l_2=77mm a_2=1mm

A=7850mm^2 W=98125mm^3

R_{23x}=716480N R_{23y}=955760N

R_{24x}=1045960N R_{24y}=215190N

Verifica a flessione

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot f_{yp}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{98125 \cdot 900}{1.1 \cdot 1.0} = 80284090Nmm$$

$$M_{Sd,x} = \frac{R_{23x}}{2} \cdot \left(\frac{l_1}{3} + a_1 + l_2 + a_2 \right) - \frac{R_{24x}}{2} \cdot \left(\frac{l_2}{2} + a_2 \right) =$$

$$= \frac{716480}{2} \cdot \left(\frac{20}{3} + 1 + 77 + 1 \right) - \frac{1045960}{2} \cdot \left(\frac{77}{2} + 1 \right) = 1004350Nmm$$

$$M_{Sd,y} = \frac{R_{23y}}{2} \cdot \left(\frac{l_1}{3} + a_1 + l_2 + a_2 \right) - \frac{R_{24y}}{2} \cdot \left(\frac{l_2}{2} + a_2 \right) =$$

$$= \frac{955760}{2} \cdot \left(\frac{20}{3} + 1 + 77 + 1 \right) - \frac{215190}{2} \cdot \left(\frac{71}{2} + 1 \right) = 4520430Nmm$$

$$M_{Sd} = \sqrt{M_{Sd,x}{}^2 + M_{Sd,y}{}^2} = 4630660Nmm$$

$M_{Sd} \leq M_{Rd}$ **Verificato**

Verifica a taglio

$$F_{v,Rd} = \frac{1}{u} \cdot \frac{A \cdot f_{yp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{7580 \cdot 900}{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 1.0} = 2781122N$$

$$F_{v,Sd} = \frac{F_p}{2} = \frac{121420}{2} = 608210N$$

$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ **Verificato**

Verifica a pressione specifica

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_y}{\gamma_m \cdot \gamma_{sp}} = \frac{1.0 \cdot 100 \cdot 77 \cdot 700}{1.1 \cdot 0.7} = 7000000N$$

$$F_{b,Sd} = \frac{R_{24}}{2} = \frac{1216420}{2} = 608210N$$

$F_{b,Sd} \leq F_{b,Rd}$ **Verificato**

Conclusioni

Verifica a fatica

La prima cosa che si osserva scrutando le norme è che negli elementi saldati l'intervallo di sollecitazione ammissibile $\Delta\sigma_{Rd}$ non tiene conto della qualità del materiale, ma solamente della presenza di saldature e della loro qualità.

Questo fatto risulta notevolmente scomodo sia dal punto di vista dell'interpretazione fisica, sia dal punto di vista della ricerca delle soluzioni.

Per quel che riguarda il significato ingegneristico, ciò che pare in disaccordo con la teoria classica è che la presenza della saldatura è tale da compromettere l'intera resistenza di un elemento.

Negli sfili delle gru analizzate, il cordone di saldatura è posto nella parte inferiore della sezione esagonale, quindi soggetto per lo più a carichi di compressione, che peraltro è l'unica sollecitazione che riduce il fenomeno della fatica.

Diversamente, negli sfili delle prolunghe integrali, le saldature sono poste sul fianco dell'esagono, in corrispondenza dell'asse neutro di flessione.

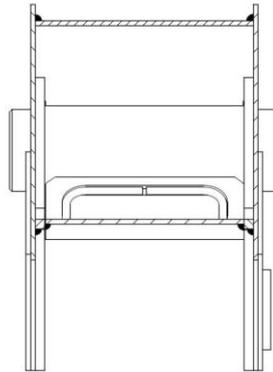
Le tensioni che giocano nell'uno o nell'altro caso sono notevolmente diverse, ciò nonostante la norma, pur considerando la presenza della saldatura un elemento estremamente significativo per la durata a fatica, non ne fa alcuna distinzione.

Questo fatto sicuramente è a vantaggio della sicurezza della macchina e degli operatori, ma parallelamente sovradimensiona gli elementi strutturali, che nel caso specifico di una gru influisce direttamente, ed in maniera molto negativa, sulle caratteristiche intrinseche della macchina.

Altro fattore discutibile sempre riguardante l'intervallo di sollecitazione ammissibile, è che la norma non tiene conto della qualità del materiale.
Gli sfili delle gru _400 e _430 sono in StE 885, corrispondenti, secondo la designazione attuale ad un acciaio S900MC EN10149-2, avente una tensione limite di snervamento pari a 900N/mm^2.
Supponendo di realizzare gli stessi organi in acciaio Fe360, corrispondente a S235 EN10025, avente una tensione limite di snervamento di 235N/mm^2, risulta intuitivo che la resistenza viene ridotta di una quantità pari al rapporto tra le due tensioni limite, ovvero di quasi 4 volte.
Ciò nonostante, la norma sempre per la presenza della saldatura, non considera la differenza tra i materiali.
Questo fenomeno va poi ad incidere sulla ricerca delle soluzioni.
Il principio alla base delle gru è quello di minimizzare il peso della macchina e gli ingombri, senza ovviamente trascurare l'aspetto economico.
A parità di massa complessiva a pieno carico dell'autocarro sul quale le gru viene montate, minor peso della gru significa maggiore capacità di trasporto del mezzo.
Tutto ciò comporta uno sfruttamento totale del mezzo, sia nella fase di trasporto del mezzo, sia nella fase di movimentazione dei carichi.
Quando una gru non risponde più ai requisiti imposti dalle norme occorre apportare delle modifiche migliorative. Non potendo agire sulla resistenza dei materiali, poiché non considerati, l'unico intervanto che è possibile fare per mettere in sicurezza la gru è aumentare le dimensioni delle sezioni resistenti.
Essendo però la gru il risultato di un progetto che ha cercato, come già accennato precedentemente, di minimizzare gli ingombri e il peso proprio, agire sulle sezioni significa necessariamente andare ad influire negativamente su di una delle caratteristiche peculiari della macchina. Bisogna quindi apportare sostanziali modifiche alla struttura della macchina, con tutto ciò che ne consegue, costi compresi, oppure declassare la gru ad una capacità di carico inferiore.
Un altro aspetto su cui vale la pena soffermarsi è il come le sollecitazioni agenti su diversi piani vengono trattate, ovvero in modo indipendente le une dalle altre.

Non è infatti rara la presenza di sollecitazioni su più piani, la cui composizione può provocare il cedimento della struttura. Trattandoli separatamente, invece, il limite imposto dalla geometria e dal materiale può risultare ancora lontano.

Dalla verifica secondo la nuova normativa ne discende che la gru si trova ad avere delle sezioni abbondantemente sovradimensionate ed altre che la cui sezione non è sufficientemente elevata da sostenere il carico imposto.

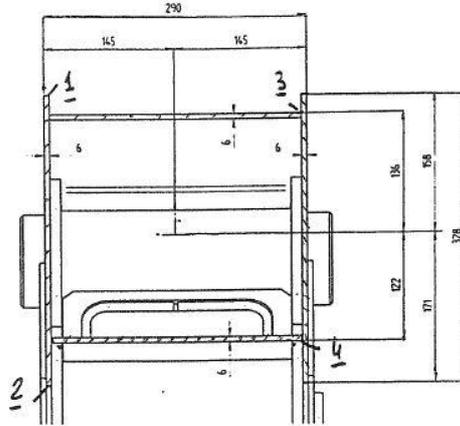
Tuttavia, la sezione che non risulta essere verificata è la S_{2A} del braccio principale nella configurazione base a 8 sfili. Su questa si possono però fare delle considerazioni importanti: per agevolare il calcolo, non è stata considerata l'area della sezione dei cordoni di saldatura che, sebbene in minima parte, contribuiscono anch'essi ad aumentare il modulo di resistenza a flessione.

Inoltre, a favore di sicurezza, non è stato considerato il martinetto come contributo attivo alla resistenza, ma solamente per quanto riguarda il carico resistente.

Tenendo conto, quindi, di tali fattori e della differenza tra gli intervalli di sollecitazione ammissibile e di progetto, si ha che la gru risulterebbe essere verificata anche nella sezione S_{2A}.

Dalla relazione di calcolo della gru_400 si mostra una verifica della sezione del braccio principale, considerando le forze effettivamente agenti su di essa.

<u>Braccio principale: braccio principale e pacco bracci allineati sull'orizzontale</u>

1° bracci allineati

Sez. A-A StE 690 A = 72.36 cm² ; Ix = 8873 cm⁴ ; Iy = 10064 cm⁴ ;
Wx1 = 561.5 cm³ Wx2 = 518.8 cm³ Wx3 = 652.4 cm³ Wx4 = 727.2 cm³ Wy = 694 cm³

Mfy = R24y . 23,2 + R23x .57 - R24x . 59 - R23y . 2,8 =
= 16675 x 23.2 + 115134 x 57- 102285 x 59 - 113212 x 2.8 = 597689 daNcm

N = 113212 - 16675 = 96537 daN (trazione) T = 115134 - 102285 = 12849 daN

σ2 = - 597689/518.8 + 41648/694 + 96537 / 72.6 = 238 daN/cm²

σ1 = 597689 / 561.5 + 41648 /694 + 96537 / 72.6 = 2454 daN/cm²

τ = 12849 / (1.2 x 25.8) + 161293 / (2x25.2x28.4x0.6) = 603 daN/cm² ; σid1 = 2667 daN/cm²

Superfluo il calcolo in 3 e 4 .

Considerando le forze effettivamente agenti, la gru risulta essere verificata.

Verifica statica

A differenza della precedente in questa verifica, oltre all'ampiezza della sezione e al modulo di resistenza, si tiene conto sia del tipo di materiale sia della composizione delle sollecitazioni qualora agiscano su diversi piani.

Secondo la normativa, il limite non è più posto sulla tensione ammissibile, la classica σ_{amm}, ma sulla tensione che la genera.

Ai fini della verifica, i due metodi sono equivalenti, ma porre il limite su una sollecitazione permette di visualizzare in maniera diretta la variazione di carichi che è possibile apportare, mantenendosi all'interno del limite di sicurezza.

Per spiegare meglio questo concetto si fa un piccolo esempio numerico.

Si supponga di avere una sollecitazione di calcolo di 300N/mm^2 ed una sollecitazione ammissibile di 400N/mm^2. Capire da una tensione di quanto si può aumentare la sollecitazione (o le sollecitazioni) che la genera prima di arrivare al limite, è tutt'altro che intuitivo, poiché bisogna tener conto anche della resistenza offerta dal materiale e dalla geometria.
Se al contrario si ha una sollecitazione limite di 40Nm ed una di progetto di 30Nm, è immediato vedere che si può aumentare la coppia di altri 10Nm pur rimanendo nel campo della sicurezza.

A seguito dei risultati ottenuti nella presente tesi, l'azienda Copma2000 ha deciso di utilizzare la stessa struttura, apportando le dovute modifiche al fine di avere una struttura con classe di sollevamento superiore, con i conseguenti vantaggi economici del caso. Trattandosi fortunatamente di una sezione che non riguarda l'impacchettamento degli sfili, le modifiche apportabili implicano costi relativamente contenuti ed un prezzo di vendita, definito in primo luogo dalla classe di sollevamento, risulterebbe molto maggiore.

		$\Delta\sigma_{Sd}\big\|_{PV}\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	$cs=\frac{\Delta\sigma_{Rd}}{\Delta\sigma_{Sd}}$
400.8	S_{12}	183.3	2.14
	S_{11}	291.3	1.34
	S_{10}	352.2	1.11
	S_9	315.2	1.24
	S_8	312.8	1.25
	S_7	305.1	1.29
	S_6	292.1	1.34
	S_5	240.6	1.63
	S_4	222.5	1.76
	$S_{2A_1st_orizzontale}$	400.0	0.98
	$S_{2B_1st_orizzontale}$	331.2	1.18
	$S_{2A_1st_verticale}$	403.0	0.97
	$S_{2B_1st_verticale}$	312.9	1.25
400.6+J4	S_{18}	190.1	2.07
	S_{17}	247.7	1.58
	S_{16}	232.2	1.69
	S_{15}	235.8	1.66
	S_{14}	223.4	1.76
	S_{10}	274.5	1.43
	S_9	221.9	1.77
	S_8	206.9	1.90
	S_7	192.3	2.04
	S_6	177.9	2.21
	S_5	142.9	2.75
	S_4	129.9	3.03
	$S_{2A_1st_orizzontale}$	230.3	1.70
	$S_{2B_1st_orizzontale}$	189.2	2.08
	$S_{2A_1st_verticale}$	226.4	1.73
	$S_{2B_1st_verticale}$	180.1	2.18

Come si può notare dalla tabella, tralasciando la sezione S_{2A}, oggetto di future modifiche, il minimo coefficiente di sicurezza si ha nella sezione S_{10} (5° braccio sfilabile) dell'allestimento base. Senza modificare tale sezione, ma semplicemente portandola al limite consentito (coefficiente di sicurezza "cs=1") si ottiene il conseguente aumento del carico sollevabile.

Nella configurazione di massimo sbraccio.

$$\frac{\Delta M_f}{W} = \Delta\sigma_{Sd} = \frac{\Delta\sigma_{Rd}}{cs} \Rightarrow \Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta M_f \times cs}{W}$$

A parità di braccio, aumentare il momento flettente equivale ad aumentare il carico sollevato di una quantità pari a "cs", da cui:

$$Q^* = Q \times cs = 900 \cdot 1.1 \cong 1000kg$$

Considerando questa come nuova portata, si basa su questa il ridimensionamento della sezione S_{2A}.

Si considera il caso peggiore con braccio principale verticale e pacco bracci orizzontale.

Supponendo che la variazione del peso proprio sia trascurabile con la nuova modifica,c on la nuova portata si avrebbe:

$$P' = \phi_1 \cdot m_{\left(2^{nd} \div 8\right)} \cdot g = 1.1 \cdot 1965 \cdot 9.81 \cong 21204N$$

$$Q'^* = \phi_2 \cdot Q \cdot g = 1.18 \cdot 1000 \cdot 9.81 \cong 11575N$$

$$M_{f,v,\max} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,A,v}}\right) + Q' \cdot \left(d_{Q'} + d_{S_{2,A,v}}\right) =$$
$$= 21204 \cdot (6.84 + 0.67) + 11575 \cdot (18.92 + 0.67) \cong 385996Nm$$

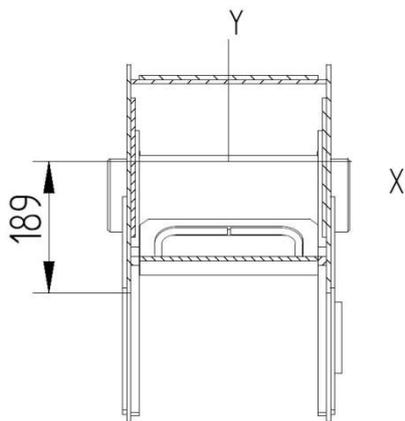
$$M_{f,v,\min} = P' \cdot \left(d_{P'} + d_{S_{2,A,v}}\right) = 21204 \cdot (6.84 + 0.67) = 154242Nm$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{M_{f,v,\max}}{W_{x_2}} - \frac{M_{f,v,\min}}{W_{x_2}} = \frac{385996 - 154242}{518.8} = 446.7\frac{N}{mm^2}$$

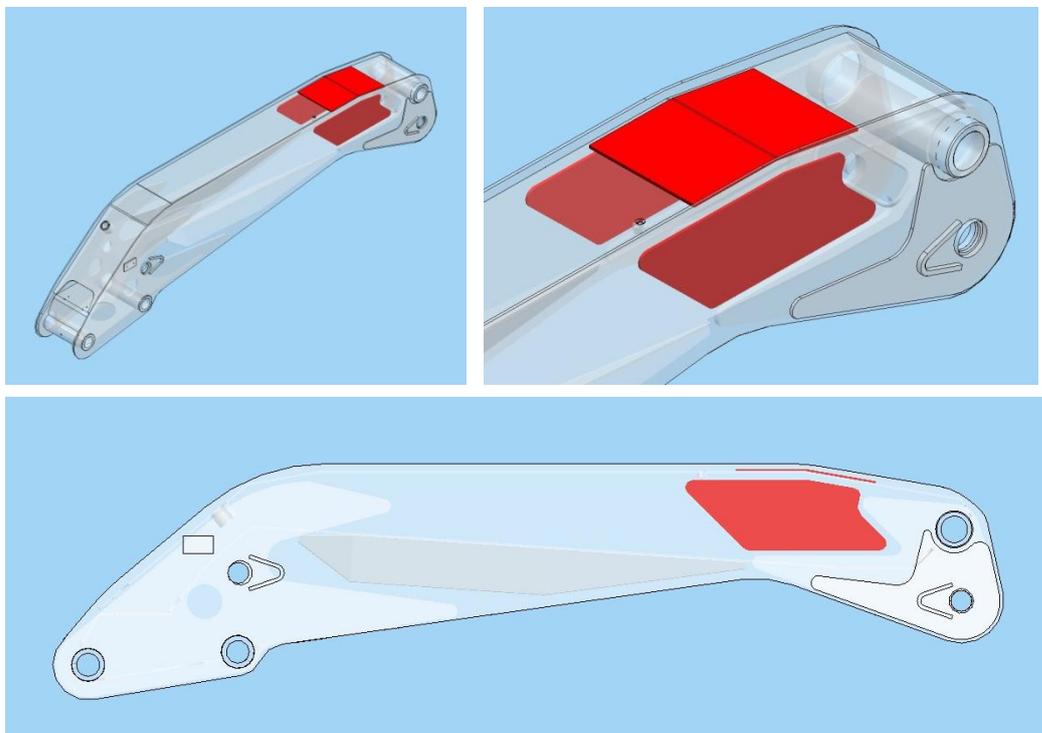
$$cs = \frac{\Delta\sigma_{Rd}}{\Delta\sigma_{Sd}} = \frac{393.6}{446.7} = 0.88$$

Occorre modificare la sezione, ovvero il modulo di resistenza flessionale: il coefficiente di sicurezza diventa dunque il rapporto tra i W_{x2} prima e dopo la modifica. Si ricava così il minimo valore del modulo di resistenza della sezione S_{2A} da ottenere con la modifica.

$$cs = 0.88 = \frac{W_{x2}}{W_{x2}^*} \Rightarrow W_{x2}^* \geq \frac{W_{x2}}{cs} = \frac{518.8}{0.88} = 589.5cm^3$$

Un esempio di soluzione è rappresentata nelle figure seguenti: sono state create tre piastre di rinforzo, da unire mediante saldatura, dello stesso spessore e materiale della struttura del braccio principale. L'incremento della sezione resistente è sufficientemente elevata da garantire la tenuta a fatica e con un incremento di massa contenuto (≥13 kg).

$A = 113.4\ cm^2$

$I_x = 12.516.5\ cm^4$

$W_{x2} = 662.2\ cm^3$

Con tale soluzione, alla sua massima estensione la gru si trova a poter sollevare una massa superiore di 100kg.

Questo incremento di massa, posto alla distanza di 21.40m dall'asse colonna genera un aumento di coppia pari a 2140kg·m, corrispondenti a circa 2 t·m.

Le gru _400 e _430 verrebbero così riclassificate come _420 e _450 rispettivamente.

Bibliografia

- UNI EN 12999 "*Gru caricatrici*"
- UNI EN 13000 "*Gru mobili*"
- UNI EN 13001-1 "*Criteri generali per il progetto: principi e requisiti generali*"
- UNI EN 13001-2 "*Criteri generali per il progetto: azioni dei carichi*"
- UNI CEN/TS 13001-3-1 "*Criteri generali per il progetto: stati limite e verifica della sicurezza delle strutture di acciaio*"
- UNI CEN/TS 13001-3-2 "*Criteri generali per il progetto: stati limite e verifica di idoneità delle funi nei sistemi in taglia*"
- Niemann - Winter - Hohn - *Elementi di macchine* - Est springer
- Baldassini - *Vademecum per disegnatori e tecnici* - Hoepli
- *Il nuovo manuale di meccanica* - Zanichelli/Esac
- Nuovo Colombo - *Manuale dell'ingegnere meccanico* - Hoepli

Appendice A
UNI EN 12999

La norma europea UNI EN 12999 “Apparecchi di sollevamento: Gru caricatrici” specifica i requisiti minimi per la progettazione, il calcolo, le verifiche e le prove delle gru caricatrici idrauliche ed il loro montaggio su autoveicoli o su fondazioni statiche.
La presente norma non è applicabile alle gru utilizzate a bordo di navi o strutture galleggianti ed alle gru per autocarro con gruppo bracci articolato progettate come parte integrale di apparecchiature speciali come macchine per l'esbosco di legname minuto.
Non tratta i pericoli correlati con il sollevamento di persone e si applica a gru per autocarro (comprese le gru per la movimentazione di legname) fabbricate dopo la data di approvazione della presente norma da parte del CEN.

- **gru per autocarro; (gru)**: Gru a motore comprendente una colonna, che ruota intorno ad una base ed un gruppo bracci che è applicato alla sommità della colonna. La gru è montata di regola su un veicolo (eventualmente su un rimorchio) ed è progettata per caricare e scaricare il veicolo.
- **articolato**: Movimento degli elementi del braccio che ruotano intorno ad un giunto con perno.
- **base**: Alloggiamento comprendente punti di ancoraggio e supporti per la colonna girevole.
- **braccio**: Elemento strutturale nel gruppo bracci della gru per autocarro.

- **sfilo, idraulico**: Parte del braccio in grado di eseguire un movimento telescopico a comando idraulico per variare la sua lunghezza.
- **prolunga manuale**: Parte del braccio che può essere estesa o retratta manualmente.
- **gruppo bracci**: Sistema completo, composto da sfili idraulici, prolunghe manuali e cilindri.
- **colonna**: Elemento strutturale che sostiene il gruppo bracci.
- **sistema di comando**: Interfaccia tra le leve di comando e gli attuatori che effettuano i movimenti della gru per autocarro.
- **stazione di comando**: Postazione dalla quale è possibile comandare la gru per autocarro.
- **zona pericolosa**: Qualunque zona all'interno e/o in prossimità di una gru nella quale una persona è esposta a rischio di lesioni o danni alla salute.
- **pesi propri**: Forze dovute alla massa delle parti fisse e mobili della gru, le quali agiscono permanentemente sulla struttura durante l'utilizzo della gru.
- **pressione dinamica**: Pressione in un componente del circuito idraulico o in parte del circuito idraulico, determinata da forze dinamiche sugli attuatori durante la movimentazione del carico.
- **accessori di presa permanenti**: Apparecchiatura con la quale il carico utile può essere sospeso e che è installata direttamente sulla testa del braccio come parte integrante della gru. Essa comprende per esempio ganci e benne.
- **valvola di blocco sensibile al flusso**: Valvola che arresta il flusso quando viene superato un livello prefissato di caduta di pressione.
- **carico lordo**: Somma delle masse di carico utile, accessori di presa e, qualora applicabile, una parte della fune.
- **sedile rialzato**: Stazione di comando collegata alla colonna, che ruota quindi insieme alla gru.
- **rottura del circuito idraulico**: Guasto in un circuito idraulico che determina una perdita di pressione nel circuito.

- **valvola di sostegno del carico**: Valvola normalmente chiusa che è aperta tramite una forza esterna per permettere il flusso di un fluido fuori da un attuatore idraulico.
- **valvola di massima generale**: Valvola che limita la pressione fornita all'impianto idraulico della gru.
- **pressione massima di lavoro**: Pressione massima nel circuito della pompa o in una singola funzione operativa.
- **momento di sollevamento netto**: Carico nominale moltiplicato per lo sbraccio.
- **accessori di presa amovibili**: Attrezzatura intercambiabile che può essere montata dall'utente direttamente o indirettamente sul gancio o su qualsiasi altro dispositivo di accoppiamento di una gru, senza influire sulla sua integrità.
- **sbraccio**: Distanza orizzontale tra l'asse di rotazione del braccio/gruppo bracci su un piano verticale e punto di applicazione del carico.
- **sbraccio, idraulico**: Sbraccio che può essere ottenuto mediante elementi a comando idraulico del gruppo bracci.
- **carico utile**: Carico che è sollevato dalla gru e sospeso dagli accessori di presa amovibili o, qualora non sia utilizzato un tale accessorio, direttamente dagli accessori di presa permanenti.
- **valvola antiurto**: Valvola che limita la pressione fornita ad un attuatore idraulico.
- **valvola di massima**: Valvola che scarica automaticamente l'olio idraulico nel serbatoio quando la pressione supera un valore specificato.
- **stazione di comando rialzata**: Stazione di comando ad una certa altezza dal livello del suolo, per esempio un sedile rialzato applicato alla colonna della gru o una piattaforma posizionata sopra alla base della gru per autocarro.

- **carico nominale**: Carico per il cui sollevamento in determinate condizioni di lavoro (per esempio configurazione, posizione del carico) è stata progettata la gru.
- **indicatore di carico**: Dispositivo che fornisce, entro i limiti di tolleranza specificati, almeno una indicazione continua del superamento del carico nominale e un'altra indicazione continua (in certi tipi di gru) dell'avvicinamento al carico nominale.
- **limitatore di carico**: Dispositivo che impedisce automaticamente che la gru movimenti carichi maggiori del carico nominale, tenendo conto degli effetti dinamici durante il normale funzionamento.
- **funzione di messa in opera**: Funzione della gru utilizzata per predisporre la gru al sollevamento.
- **velocità di discesa (per cedimento)**: Distanza in un dato tempo in cui il carico scende a causa dei trafilamenti interni dei componenti idraulici.
- **rotazione**: Movimento rotatorio della colonna e del gruppo bracci intorno ad un asse verticale.
- **stabilizzatore**: Supporto della struttura di sostegno fissato alla base della gru o al veicolo al fine di dare stabilità, senza sollevare il veicolo dal suolo.
- **braccio stabilizzatore**: Parte dello stabilizzatore in grado di estendere lateralmente il martinetto stabilizzatore dalla posizione di trasporto a quella di lavoro.
- **martinetto stabilizzatore**: Parte di uno stabilizzatore in grado di stare a contatto con il suolo per fornire la stabilità richiesta.
- **fondazione fissa**: Supporto fisso comprendente punti di montaggio per una gru.
- **gru per la movimentazione di legname**: Gru per autocarro progettata, costruita ed equipaggiata specificatamente con un organo di presa per caricare/scaricare il legname non trattato (per esempio tronchi d'albero, rami). L'operatore comanda la gru da un sedile rialzato o dalla cabina.

- **momento di sollevamento totale**: Somma del momento di sollevamento netto e del momento prodotto dai pesi propri.

Lista dei pericoli significativi

Lista di situazioni pericolose e di eventi pericolosi significativi che potrebbero causare rischi alle persone durante il normale utilizzo e l'utilizzo scorretto prevedibile. La norma UNI EN 12999 contiene anche i punti che è necessario seguire per ridurre o eliminare i rischi connessi a tali pericoli.

- **Pericoli di natura meccanica generati da**:
  - Inadeguatezza della resistenza meccanica della gru e delle sue parti
  - Pericolo di schiacciamento
  - Pericolo di cesoiamento
  - Pericolo di taglio o sezionamento
  - Pericolo di impigliamento
  - Pericolo di trascinamento o intrappolamento
  - Pericolo di urto
  - Pericolo di perforazione o puntura
  - Pericolo di strisciamento o abrasione
  - Iniezione o eiezione di fluido ad alta pressione
  - Proiezione di oggetti
  - Perdita di stabilità
  - Scivolamento, inciampo, caduta

- **2 Pericoli di natura elettrica generati da**:
  - Contatto di persone con elementi in tensione (contatto diretto)
  - Contatto di persone con elementi che entrano in tensione in caso di guasto (contatto indiretto)
  - Avvicinamento ad elementi ad alta
  - Fenomeni elettrostatici
  - Radiazioni termiche o altri fenomeni come la proiezione

- di particelle fuse e gli effetti chimici derivanti da
  - cortocircuiti, sovraccarichi, ecc.

- **3 Pericoli di natura termica, che causano**:
  - Bruciature, scottature o altre lesioni da possibile contatto di persone con oggetti o materiali a temperature estremamente elevate o estremamente basse, da fiamme o esplosioni ed anche per radiazione da sorgenti di calore
  - Effetti dannosi alla salute provocati da un ambiente di lavoro caldo o freddo

- **4 Pericoli generati dal rumore** "Non significativo per gru che non comprendono la sorgente di potenza".
- **5 Pericoli generati da vibrazioni** 1.5.9 5.10.5
- **7 Pericoli generati da materiali e sostanze (e dagli elementi chimici che li costituiscono) lavorati o utilizzati dalla macchina**
  - Pericoli da contatto o inalazione di fluidi dannosi, gas,nebbie, fumi e polveri

Appendice B

Materiali utilizzati

Si riportano di seguito le caratteristiche principali dei materiali usati negli elementi delle gru _400 e _430.

- **Fe 430**: secondo le normative europee è designato con “**S 275JR**”

A di uso generale con proprietà di saldabilità e caratteristiche meccaniche discrete. Questo tipo di acciaio viene usato per tutti i tipi di costruzioni. Dal punto di vista generale è un acciaio idoneo alla saldatura.

Composizione chimica									
	C % per spessori in mm			Si %	Mn %	P %	S %	N %	Cu %
	≤16	>16 ≤40	>40						
da	-	-	-	-	-	-	-	-	-
a	0.21	0.21	0.22	-	1.50	0.035	0.035	0.012	0.55

*** Caratteristiche meccaniche**	
Spessore mm	Trafilato a freddo (+C)

	Rp0,2 minimo (MPa)	Rm minimo (MPa)	A5 % minimo
≤5	490	590 ÷ 880	6
>5 ≤10	440	540 ÷ 840	7
>10 ≤16	380	540 ÷ 840	7
>16 ≤25	340	540 ÷ 765	8
>25 ≤40	300	490 ÷ 735	9
>40 ≤80	265	440 ÷ 700	11
>80	-	-	-
* Stato di fornitura: naturale di laminazione.			

- **C40**

Acciaio al carbonio semiduro, impiegato per assali, alberi, ingranaggi, coltellerie comuni, vomeri, steli porta utensili, blocchi porta stampi, ecc.

Composizione chimica [%]							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	altri	
0.37÷0.44	0.50÷0.80	0.15÷0.40	-	-	-	P e S ≤0.35	
Temperature per la lavorazione a caldo ed il trattamento termico [°C]							
Punti critici	fucinatura	normalizzazione	Ricottura subcritica	Ricottura isotermica	tempra	rinvenimento	
Ac1 730 Ac3 780 Ms 360	1100÷850	840÷880	650÷700	650÷700 ↓ 660 x 1h	830÷850 acqua	550÷560	
Caratteristiche meccaniche							
Stato	Saggio ø [mm]	Re_{min} [N/mm^2]	Rm [N/mm^2]	A_{min} [%]	KCU_{min} [J]	Durezza HB allo stato	
bonificato	16	490	700÷840	15	25	Ricotto lavorabile	≤220
	16÷40	420	640÷780	17	25	Ricotto isotermico	155÷210
	40÷100	370	590÷7	18	20	Ricotto	≤179

			40			sferoidale	
Normalizzato	16÷100	325	520÷720	18	-		

Temprabilità			
HRC / % martensite		Diametro temprabile [mm]	
90%	50%	olio	acqua
53	42	-	25

- **StE 460 bonificato**: secondo le normative europee è designato con "**20 Mn V 6**"

Acciaio micro legato con buone caratteristiche di saldabilità. Grazie alla sua struttura fornisce migliori performance meccaniche alle basse temperature. Viene prodotto esclusivamente allo stato naturale.

<table>
<tr><th colspan="8">Composizione chimica [%]</th></tr>
<tr><td>C</td><td>Si</td><td>Mn</td><td>P</td><td>S</td><td>Cr</td><td>Mo</td><td>V 0.10÷0.20</td></tr>
<tr><td>0.16÷0.22</td><td>0.10÷0.50</td><td>1.30÷1.70</td><td>0.032</td><td>0.035</td><td>-</td><td>-</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="8">Caratteristiche meccaniche</th></tr>
<tr><td>Gamme dimensionali</td><td>Carico di rottura [N/mm²]</td><td>Carico di snervamento [N/mm²]</td><td>Allungamento [%]</td><td>Durezza HB</td><td colspan="3">Stato di fornitura</td></tr>
<tr><td>Tutti i ø</td><td>600÷780</td><td>450</td><td>20</td><td>180÷225</td><td colspan="3">Non trattato/temprato</td></tr>
<tr><th colspan="8">Caratteristiche di tempra superficiale</th></tr>
<tr><td colspan="2">Diametro [mm]</td><td colspan="3">Profondità [mm]</td><td colspan="3">Durezza HRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">25</td><td colspan="3">0.75÷1.25</td><td colspan="3" rowspan="3">42÷48</td></tr>
<tr><td colspan="2">26÷89</td><td colspan="3">1.25÷2.25</td></tr>
<tr><td colspan="2">90</td><td colspan="3">1.8÷3.0</td></tr>
</table>

- **Filo per molle classe B UNI 3823** (anelli elastici dei martinetti)

La classe B indica media resistenza e sollecitazioni prevalentemente statiche.
Sono costruite in acciaio ricotto che deve subire un trattamento di bonifica dopo avvolgimento.

d [mm]	Resistenza [N/mm^2]
0.1÷0.2	-
0.25	2160÷2460
0.3÷0.5	2110÷2410
0.5÷0.65	2060÷2360
0.7÷0.9	1960÷2260
1	1910÷2210

d [mm]	Resistenza [N/mm^2]
1.1÷1.4	1860÷2160
1.5÷1.9	1770÷2070
2÷2.5	1720÷1970
2.6÷4	1570÷1820
4.2	1520÷1770
4.5÷5	1470÷1720

d [mm]	Resistenza [N/mm^2]
5.5÷7	1370÷1570
7.5÷8	1280÷1480
8.5÷11	1180÷1330
12÷13	1130÷1280

- **Fe 52.2 BK + S**

Acciaio strutturale comunemente usato per assiemi saldati, con buona tenacità garantita anche a 0°C. Può essere utilizzato per costruzioni sollecitate staticamente e dinamicamente.

Composizione chimica [%]										
C	Si	Mn	P	S	N	Al	Ni	Nb	Ti	V
0.22	0.55	1.60	0.35	0.035	-	0.020	-	-	-	-

Caratteristiche meccaniche				
Resistenza a trazione Rm [N/mm^2]	Limite di snervamento $R_{p\ 0.2}$ [N/mm^2]	Allungamento a rottura A_5 [%]	Stato di fornitura	Resilienza [J]
570	470	15	BK + S (crudo rinvenuto)	21

- **C 10**

Acciaio dolce al solo carbonio, facilmente lavorabile a freddo e saldabile senza alcuna particolare precauzione. Stato di fornitura: naturale di laminazione.

Composizione chimica [%] (analisi di colata secondo norma EN 10277-2)					
	C	Si	Mn	P	S
Da	0.07	-	0.30	-	-
a	0.13	0.40	0.60	0.045	0.45

Caratteristiche meccaniche (secondo norma UNI 10277-2)					
Spessore mm	Laminato + pelato rullato (+SH)		Trafilato a freddo (+C)		
	Durezza HB	Rm [Mpa]			

			Rp0,2 minimo [MPa]	Rm minimo [MPa]	A_5 [%] minimo
≥5 ≤10	-	-	350	460÷760	8
>10 ≤16	-	-	300	430÷730	9
>16 ≤40	92÷163	310÷550	250	400÷700	10
>40 ≤63	92÷163	310÷550	200	350÷640	12
>63≤100	92÷163	310÷550	180	320÷580	12

- **C 45 normalizzato**

È il più usato e va sostituendo il C40 in molte applicazioni.
Particolarmente adatto per la tempra superficiale con min. HRC 55.

Analisi chimica [%]						
Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
0.50÷0.80	≤ 0.40	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.40	≤ 0.10	≤ 0.40
Caratteristiche meccaniche						
Diametro saggio [mm]	R_m [N/mm^2]	Re_{min} [N/mm^2]	A_{5min} [%]	KV_{min} [J]	HB_{max} [J]	
≤ 16	≥ 620	340	16	-	-	

- **9SMnPb36**

Acciaio non destinato al trattamento termico causa dell'elevato contenuto di zolfo. Generalmente non raccomandato per la saldatura.

Caratteristiche meccaniche					
Stato del materiale	Diametro saggio [mm]	R [N/mm^2]	R_{Smin} [N/mm^2]	A_{5min} [%]	Durezza HB_{max}
Normalizzato	-	390÷590	215	22	-
Trafilato crudo	≤10	540÷430	-	6	-
	>10 ≤16	490÷740	-	7	-
	>16 ≤40	440÷590	-	8	-

- **39NiCrMo3 bonificato**

Composizione chimica [%]						
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P e S
0.35÷0.43	0.50÷0.80	0.15÷0.40	0.60÷1.00	0.70÷1.00	0.12÷0.25	≤0.35
Temperature per la lavorazione a caldo ed il trattamento termico [°C]						
Punti critici	fucinatura	normalizzazione	ricottura subcritica	ricottura isotermica	tempra	rinvenimento
Ac1 740	1100÷900	850÷880	650÷700	810÷880 ↓ 650 x 1h	830÷860 Acqua	550÷560
Ac3 790						
Ms 330						

Caratteristiche meccaniche								
Stato	Saggio ø [mm]	Re_{min} [N/mm^2]	Rm [N/mm^2]	A_{min} [%]	KCU_{min} [J]		Durezza HB allo stato	
bonificato	16	785	980÷1180	11	30		Ricotto lavorabile	≤220
	>16	735	930÷1130	11	30		Ricotto isotermico	155÷210
	>40	685	880÷1080	12	30			
	>100	635	830÷980	12	30		Ricotto sferoidale	≤179
	>100≤250	540	740÷880	13	30			

Temprabilità			
HRC / % martensite		Diametro temprabile [mm]	
90%	50%	olio	acqua
53	42	-	25

- **Ghisa SF400**

Ghisa sferoidale con una struttura ferritica ottenuta per mezzo di un trattamento termico. E’ usata quando viene richiesta una buona lavorabilità e una buona lucidità dei particolari finiti. Per la sua struttura ferritica, è raccomandata per usi che richiedono una alta conduttività elettrica e di calore. Questa lega ha una buona lavorabilità ed una buona elasticità.

Proprietà meccaniche e fisiche	
Resistenza a trazione [N/mm^2]	400
Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità min. [N/mm^2]	250
Allungamento min. [%]	20
Modulo di elasticità [N/mm^2]	160000
Modulo di elasticità tangenziale [N/mm^2]	62000
Durezza HB [N/mm^2]	13÷17
Resilienza min a T = -20°C [J]	14
Resilienza D.V.M. [J]	100
Limite di fatica a flessione alterna [N/mm^2]	±200
Resistenza alla compressione [N/mm^2]	700
Coefficiente di Poisson [-]	0.28
Coefficiente di dilatazione termica da 20 a 200°C [$°C^{-1}$]	10
Conduttività termica da 20 a 200°C[W/m^2K]	40
Densità a 20°C [kg/dm^3]	7.1
Ritiro per modello [%]	0÷0.5

- **34NiCrMo16**

Acciaio speciale da bonifica usato generalmente per la costruzione di organi fortemente sollecitati sia staticamente che dinamicamente.

<table>
<tr><th colspan="9">Composizione chimica [%]</th></tr>
<tr><td>C</td><td>Mn</td><td>Si</td><td>Cr</td><td>Ni</td><td>Mo</td><td colspan="3">P e S</td></tr>
<tr><td>0.31÷0.38</td><td>0.30÷0.60</td><td>0.15÷0.40</td><td>1.60÷2.00</td><td>3.70÷4.20</td><td>0.25÷0.45</td><td colspan="3">≤0.35</td></tr>
<tr><th colspan="9">Temperature per la lavorazione a caldo ed il trattamento termico [°C]</th></tr>
<tr><td>Punti critici</td><td>fucinatura</td><td>normalizzazione</td><td>Ricottura subcritica</td><td>Ricottura isotermica</td><td>tempra</td><td colspan="3">rinvenimento</td></tr>
<tr><td>Ac1 700</td><td rowspan="3">1100÷900</td><td rowspan="3">830÷860</td><td rowspan="3">650÷670</td><td rowspan="3">-</td><td rowspan="3">830÷860
aria
olio</td><td colspan="3" rowspan="3">550÷600

160÷180</td></tr>
<tr><td>Ac3 750</td></tr>
<tr><td>Ms 240</td></tr>
<tr><th colspan="9">Caratteristiche meccaniche</th></tr>
<tr><td>Stato</td><td>Saggio ø [mm]</td><td>Re_{min} [N/mm^2]</td><td>Rm [N/mm^2]</td><td>A_{min} [%]</td><td>KCU_{min} [J]</td><td rowspan="5"></td><td colspan="2">Durezza HB allo stato</td></tr>
<tr><td rowspan="3">bonificato</td><td>≤16</td><td>1030</td><td>1230÷1420</td><td>9</td><td>20</td><td>Ricotto lavorabile</td><td>≤275</td></tr>
<tr><td>≤40</td><td>1030</td><td>1230÷1420</td><td>9</td><td>20</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>≤100</td><td>930</td><td>1130÷1320</td><td>10</td><td>25</td></tr>
</table>

	≤160	880	1080÷1270	10	25			
	≤250	785	980÷1180	11	25			
temprato disteso	11	1275	1720÷1960	7	15			

Temprabilità			
HRC / % martensite		Diametro temprabile [mm]	
90%	50%	olio	acqua
-	-	-	-

➢ 42CrMo4

Acciaio ben lavorabile a caldo e a freddo, non presenta fragilità nel rinvenimento. Adatto per la costruzione di particolari che lavorano a temperature fino a 400°, alberi e tiranti. E' resistente allo scorrimento a caldo. Può essere sottoposto a trattamento di nitrurazione.

<table>
<tr><th colspan="6">Composizione chimica [%]</th></tr>
<tr><td>C</td><td>Mn</td><td>Si</td><td>Cr</td><td>Ni</td><td>Mo</td></tr>
<tr><td>0.38÷0.45</td><td>0.60÷0.90</td><td>≤0.40</td><td>0.90÷1.20</td><td>-</td><td>0.15÷0.30</td></tr>
<tr><th colspan="6">Caratteristiche meccaniche</th></tr>
<tr><td>Stato</td><td>Saggio ø [mm]</td><td>Re_{min} [N/mm^2]</td><td>Rm [N/mm^2]</td><td>A_{min} [%]</td><td>KCU_{min} [J]</td></tr>
<tr><td rowspan="5">bonificato</td><td>≤16</td><td>900</td><td>1100÷1300</td><td>10</td><td>30</td></tr>
<tr><td>16÷40</td><td>750</td><td>1000÷1200</td><td>11</td><td>35</td></tr>
<tr><td>40÷100</td><td>650</td><td>900÷1100</td><td>12</td><td>35</td></tr>
<tr><td>100÷160</td><td>550</td><td>800÷950</td><td>13</td><td>35</td></tr>
<tr><td>160÷250</td><td>500</td><td>750÷900</td><td>14</td><td>35</td></tr>
</table>

Ringraziamenti

Al termine della mia carriere universitaria, il mio primo doveroso e più sentito ringraziamento và ai miei genitori e a mio fratello Stefano che, oltre a darmi la possibilità di arrivare fino a questo punto, mi hanno sostenuto in tutto e per tutto, credendo in me e nella mia tenacia, specialmente nei momenti di sconforto.

Spero un giorno di essere in grado di ricambiare.

Ringrazio la mia Silvia che è sempre stata il mio modello da seguire e che a modo

suo mi ha dato sempre la forza di continuare a sbattere la testa contro al muro.

Ringrazio Sam, col quale ho condiviso pesanti giornate di studio, e Iacopone sempre pronto a dare il giusto consiglio.

Ringrazio i colleghi dell'ufficio tecnico della Copma2000, in particolare Giuliano, ma anche l'ing. Di Gioia, Zanna, Massimo, Lucio e Carlo.

Ringrazio infine il mio relatore prof. ing. Dal Re ed il mio correlatore aziendale ing. Barlotti senza il cui impagabile aiuto sarebbe stato impossibile realizzare questa tesi.

Cesare